

*А. Ф. Вагюнина, З. А. Корчагина*

**М**ЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФИЗИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ  
ПОЧВ  
И ГРУНТОВ

А. Ф. ВАДЮНИНА и З. А. КОРЧАГИНА

# МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ И ГРУНТОВ (В поле и лаборатории)

*Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия  
для государственных университетов  
СССР*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«ВЫСШАЯ ШКОЛА»  
Москва—1961

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие предназначается для студентов университетов при прохождении курса почвоведения, физики и мелиорации почв и грунтов.

В настоящее время назрела необходимость в учебном пособии по определению физических свойств почв и грунтов, отражающем последние научные исследования советских и зарубежных ученых, так как отсутствие подобного руководства осложняет учебный процесс, создает разнобой в методике исследования одного и того же свойства почвы, а это весьма затрудняет оценку и использование научных данных для теоретических обобщений и практических рекомендаций в целях дальнейшего развития сельскохозяйственного производства. В пособии рассматривается ряд методик, разработанных лабораторией физики почв Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, возглавляемой профессором Н. А. Качинским. Многие методы и приборы лаборатории получили всеобщее признание и широко применяются в практике почвенных исследований.

В книге приводятся методические работы физико-агрономического Института ВАСХНИЛ, Института почвоведения Академии наук СССР и других научных учреждений Советского Союза, а также данные зарубежных учебных пособий по физике почв и материалы, опубликованные в периодических изданиях последних лет.

Учебное пособие состоит из 10 глав и приложения. Главы I, IV, V, VI, VIII, IX и приложение написаны А. Ф. Вадюниной; II, III, VII и X — З. А. Корчагиной.

Деление на главы произведено по основному физическим свойствам почвы. В каждой главе дается краткая характеристика изучаемого свойства почвы, описываются методы определения этого свойства в поле и лаборатории, особо подчеркивается практическое значение полученных данных. В случае наличия

различных методов определения одного и того же свойства почвы описание методов группируется по принципу, положенному в их основу.

Авторы надеются, что книга принесет пользу студентам, агрономам и почвоведом-практикам.

*Авторы*

---

## ВВЕДЕНИЕ

Учение о физических свойствах и режимах почвы как естественнo-исторического тела называют *физикой почвы*. Изучение физики почвы включает в себя:

1) изучение почвенной массы — ее веса, дисперсного и структурного состояния, а также строения почвы; 2) изучение воздушных свойств и режима почвенного воздуха; 3) изучение водных свойств почвы и водного режима; 4) изучение тепловых свойств и режима почвы; 5) изучение физико-механических свойств почвы; 6) изучение электрических и радиоактивных свойств почвы (описание этих свойств дано в главе V в связи с использованием их для определения влажности почв и грунтов).

Знание физических свойств почвы необходимо для успешного выращивания сельскохозяйственных растений, а также для изучения генезиса почв. Наиболее тесный контакт физика почвы как наука имеет с земледелием и мелиорацией, основной задачей которых является временное и коренное улучшение, главным образом, физических свойств почвы для практических целей сельскохозяйственного производства. Так, при разработке агротехники различных культур по зонам основными показателями являются физические свойства почв данной зоны. В зоне недостаточного увлажнения положительную оценку получают те приемы, которые будут способствовать накоплению и сохранению влаги в почве, и, наоборот, в условиях избыточного увлажнения мелиоративные и агротехнические мероприятия должны быть направлены в сторону уменьшения влажности почвы, увеличения ее аэрации.

Оптимальными физическими свойствами и режимами (водным, воздушным и тепловым) следует считать такие, при которых можно получить максимальный урожай культивируемого растения на данной почве при полной обеспеченности ее элементами пищи.

В практике сельского хозяйства часто недооценивают важ-

ности физических условий почвы и плодородие ее связывают главным образом с наличием элементов пищи. Между тем уже с середины XIX столетия было установлено, что нельзя повысить плодородие почвы, не обеспечив растения соответствующим количеством воды, воздуха и тепла. Русские ученые В. В. Докучаев и П. А. Костычев неоднократно отмечали необходимость коренных улучшений водных и физических свойств почвы для борьбы с засухой

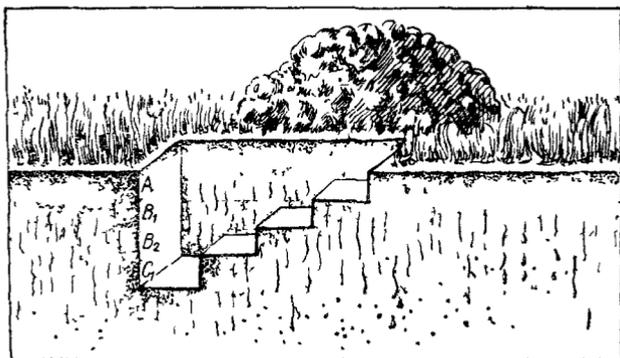


Рис. 1. Схема почвенного разреза для изучения физических свойств почвы

В настоящее время изучению физических свойств почвы уделяется большое внимание; оно производится как в стационарных, так и в экспедиционных условиях. При составлении крупно- и мелкомасштабных почвенных карт колхозов и совхозов, территорий опытных станций, при мелкомасштабных региональных почвенных съемках необходимо давать физическую характеристику основных почвенных типов. Для изучения физических свойств почвы в полевых условиях применяется метод «ключей». Сущность этого метода сводится к следующему: по имеющейся почвенной карте выделяют основные генетические почвенные разности и их варианты по механическому составу, затем на типичных для данного района рельефе и почве выделяют опытную площадку — «ключ» —  $10 \times 10$  м или  $100 \times 100$  м, закладывают на ней 1—2 почвенных разреза глубиной до 2 м и более, производят детальное морфологическое описание почвы и затем уступами, являющимися рабочими площадками (размером 1—1,5 м<sup>2</sup>), делают разрез для изучения физических свойств почвы (рис 1). Поверхность площадки соответствует началу генетического горизонта почвы. На каждой опытной площадке «ключе» определяют:

1) Удельный вес скелета почвы; контроль определения в верхнем горизонте пятикратный, в остальных горизонтах тройной.

2) Плотность; определяют прибором Качинского или прибором другой конструкции; контроль десятикратный.

3) Водопроницаемость; изучают методом трубок — контроль десятикратный при малых трубках и пятикратный — при больших. Водопроницаемость на поверхности почвы определяют методом малых заливаемых площадей около основного разреза; контроль определения тройной.

4) Влажность почвы; до глубины 2 м определяют попутно с определением удельного веса скелета почвы. С 2 м пробы на влажность берут в дне разреза буром через каждые 10 см до глубины грунтовых вод или, при глубоком их залегании, до 5 — 10 м глубины. После взятия буром пробы в образце определяют на ощупь влажность и механический состав, отмечают наличие новообразований и включений, на основании чего составляют характеристику материнской и подстилающей породы.

5) Влагоемкость почвы; определяют на площадках после определения водопроницаемости. Для предохранения от испарения влаги площадки закрывают клеенкой, травой, соломой и т. п., и через 24 час на песчаных, через 48 час на суглинистых почвах берут пробы на влагоемкость по всему увлажненному слою почвы и на 20 см ниже видимой границы смоченности.

6) Профиль смоченности почвы; определяют зарисовкой в траншее, заложенной через центр всех рам до глубины промачивания.

7) Испарение влаги из почвы; определяют с помощью испарителей или по режиму влажности почвы, для чего закладывают специальные площадки. Испарение изучается в стационарных или полустационарных условиях.

8) Измерение температуры почвы; до глубины 20 см производят термометрами Савинова, на поверхности почвы — срочным, максимальным и минимальным термометрами. Весьма желательно определять температуры при изучении испарения, устанавливая один комплект термометров на площадке искусственно увлажненной, второй — на площадке с естественной влажностью.

Для изучения почвы в лаборатории необходимо правильно взять образцы в поле. Образцы для определения механического состава, водных, тепловых и других физических свойств почвы берут из середины генетического горизонта (весом около 1 кг). Из почвы вырезают прямоугольный параллелепипед высотой и длиной 10 см и шириной 6—8 см, аккуратно и плотно упаковывают для доставки в лабораторию.

Образцы для микроскопического изучения структуры и порозности почвы в поле парафинируют: 3 контрольных образца размером 5×5×5 см опускают в чашку с расплавленным парафином, после охлаждения упаковывают и доставляют в лабораторию.

Для определения удельного веса твердой фазы почвы в лабо-

ратории используют образцы, по которым был определен в поле удельный вес скелета, или объемный вес почвы. Все контрольные образцы одной глубины соединяют в одну пробу, которую и доставляют в лабораторию.

Для изучения в лаборатории коэффициента фильтрации и других водных свойств берут монолиты почв размером  $15 \times 20 \times 50$  и  $15 \times 20 \times 100$  см.

Для изучения динамики липкости и твердости почвы берут монолиты размером  $50 \times 50 \times 50$  см.

Все указанные работы проводятся специально оснащенными экспедиционными отрядами в поле.

---

---

## ГЛАВА I

### МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЧВЫ

Твердая фаза почвы и грунта состоит из минеральных, органических и органоминеральных частиц размером от молекулярных, коллоидальных величин до грубых дисперсий — ила, пыли, песка и камней, поэтому почва считается полидисперсной системой. Для изучения почвы прежде всего необходимо определение размеров, составляющих почву частиц и содержания частиц разных размеров в ней. Количественное определение в почве содержания элементарных механических частиц составляет главную задачу механического анализа<sup>1</sup>.

Механический состав почв является важной генетической и агрономической характеристикой почвы. При выработке генетической классификации почв выделяются виды и разновидности изучаемого почвенного типа по механическому составу. Плодородие в значительной степени связано с механическим составом почв. Известно, например, что песчаные и супесчаные почвы бедны элементами пищи для растений; глинистые и суглинистые почвы содержат их в достаточном количестве.

От механического состава почв зависят почти все физические свойства почв: порозность, влагоемкость, водопроницаемость, водоподъемная способность, воздушный и тепловой режимы и др. Эти свойства в значительной мере определяют рост, развитие и урожай сельскохозяйственных культур.

От механического состава зависят также и технологические

---

<sup>1</sup> Термин «механический» не отвечает понятию «дисперсное состояние вещества» и может иметь скорее отношение только к технике производства дисперсионного анализа, тогда как гранулометрический означает *granulum* — зернышко, *metria* — измерение и, следовательно, в большей мере соответствует указанному понятию. Однако термин «механический анализ» имеет более широкое распространение

свойства почвы: твердость, прилипание к почвообрабатывающим орудиям, крошение пласта при вспашке, а следовательно, качество вспашки и пашни, удельное сопротивление почвы при обработке.

Наличие глинистых частиц в почвах и грунтах придает им пластичность, имеющую большое значение при обработке почв, при использовании грунтов в гончарном производстве, в формовочных цехах и т. д.

### КЛАССИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЧВЫ

Для правильного проведения механического анализа важно знание основных классификаций механических элементов почвы.

*Гранулой*, или элементарной почвенной частицей, называют обособленную минеральную, органо-минеральную или органическую частицу кристаллического или амфорного строения, все молекулы которой находятся в химической взаимосвязи. Различают первичные механические элементарные частицы, которые образуются в процессе выветривания, дробления горных пород и минералов (под влиянием физических атмосферных факторов — температуры, ветра и водных потоков), и вторичные частицы, образующиеся путем синтеза конечных продуктов выветривания молекулярного и коллоидального размеров, коагуляции, а также биологическим путем в результате жизнедеятельности высших и низших растений.

Из первичных частиц обычно состоят крупные фракции, из вторичных — мелкие: глинистые и иловатые. Исследованиями ученых (К. Д. Глинка, А. А. Аттерберг, А. А. Роде, Мазуренко, Г. Дикий, С. С. Морозов, П. Ф. Мельников, Е. И. Кочерина и др.) установлено, что частицы разного размера имеют различный химико-минералогический состав и различные физические свойства. Это обстоятельство и легло в основу классификации частиц.

Вопросами классификации механических элементов занимались многие ученые: Кноп, Осборн, А. А. Аттерберг, А. Н. Сабанин, В. Р. Вильямс, В. Т. Глушков, В. В. Охотин, Н. А. Качинский и др. А. А. Аттерберг на основании изучения свойств элементарных частиц различного размера установил, что частицы диаметром 0,2 мм обладают хорошей водопроницаемостью. Поднятие воды по капиллярам в них осуществляется быстро, но на малую высоту. Частицы размером от 0,2 до 0,02 мм обеспечивают хорошую водопроницаемость и водоподъемную способность почвы; частицы 0,02—0,002 мм слабо водопроницаемы, воду поднимают высоко, но очень медленно. Наихудшую водопроницаемость и самый медленный капиллярный подъем имеют почвы, сложенные из частиц диаметром 0,002 мм; частицы 0,02 мм способны коагулировать в солевых растворах, частицы крупнее этого размера — не коагулируют; частицы < 0,002 мм подвержены броуновскому движению. С 1930 г. выводы Аттер-

берга были положены в основу международной классификации механических элементов. Однако в Советском Союзе эта классификация используется редко.

Н. А. Качинский, используя отечественные данные о свойствах фракций различного размера, предложил свою классификацию механических элементов, которая в настоящее время широко применяется в почвенной практике. В этой классификации (табл. 1) выделяется каменистая часть, песок разного 'размера, пыль и ил. При выделении фракции пыли и ила в основу была положена скорость падения частиц в воде, т. е их гидравлическая крупность, которая определяется по формуле Стокса. При этом также учитывались химические, водные и физико-химические свойства частиц.

Все частицы крупнее 1 мм называются скелетной частью почвы, меньше 1 мм — мелкоземом.

Деление частиц на «физический» песок — частицы  $>0,01$  мм — и «физическую глину» — частицы  $0,01$  мм — ввел Н. М. Сибирцев для классификации почв по механическому составу, что широко используется в этих же целях и в настоящее время.

Таблица 1  
Классификация механических элементов почвы

Эффективный диаметр механических элементов почвы в мм	Наименование механических элементов
$> 3$	Каменистая часть почвы
3—1	Гравий
1—0,5	Песок крупный
0,5—0,25	Песок средний
0,25—0,05	Песок мелкий
0,05—0,01	Пыль крупная (лёссовидная фракция)
0,01—0,005	Пыль средняя
0,005—0,001	Пыль мелкая
$< 0,001$	Ил
	а) 0,001 — 0,0005 — глинистый ил
	б) 0,0005—0,0001 — коллоидный
	в) 0,0001—коллоиды
$> 0,01$	«физический» песок
$< 0,01$	«физическая» глина

### МЕТОДЫ ПОДГОТОВКИ ПОЧВЫ К МЕХАНИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ

Механические элементы, особенно мелкие, в свободном состоянии встречаются только в почвах песчаных; в суглинистых и глинистых они соединены в микроагрегаты и структурные комочки, поэтому для количественного учета частиц разного размера необходима специальная подготовка почвы.

Основная задача подготовки почвы к механическому анализу состоит в том, чтобы расчленил агрегаты почвы на составляющие их первичные механические элементы или частицы.

Разрушение почвенных агрегатов на отдельные механические элементы можно осуществить двумя методами: 1) механическим, или физическим и 2) химическим.

### **Физические методы подготовки почвы**

Разрушение почвенных агрегатов можно производить растиранием сухой почвы в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником, растиранием влажной почвы, кипячением почвенной суспензии и взбалтыванием.

**Растирание влажной почвы** предложено в 1902 г. Г. Ф. Нефедовым. В последнее время более детально эти вопросы изучены Айдиняном и в лаборатории физики почв МГУ В. Е. Корневской. Для диспергации навеску почвы помещают в фарфоровую чашку, смачивают до тестообразного состояния, что примерно отвечает влажности нижней границы текучести. Затем в течение 10—15 мин растирают пестиком с резиновым наконечником, после чего производят анализ. Описанный метод пригоден для подготовки дерново-подзолистых, серых лесных почв, в меньшей степени (по сравнению с методом подготовки почв Н. А. Качинского) для невискипающих черноземов и совсем не применим для почв карбонатных и красноземов, суспензии которых после растирания быстро коагулируют. Он широко применяется для выделения частиц различного размера при изучении их минералогического, химического состава и физических свойств.

**Кипячение почвенной суспензии** — энергичный способ для диспергирования почв. Вследствие неодинакового расширения минералов в разных направлениях и набухания почвенных агрегатов с повышением температуры увеличивается растрескивание и распадение агрегатов на механические элементы, увеличивается движение частиц почв и воздуха, что вызывает перетирание почвенного цемента и распадение микроагрегатов. При нагревании увеличивается растворимость почвенных солей, которые в зависимости от их химического состава вызывают диспергацию или коагуляцию почвенной суспензии (чаще всего наблюдается первое).

Кипячение производят обычно при определенных соотношениях почвы и воды, в колбах с обратным холодильником. Рекомендуют различные сроки кипячения почвенной суспензии. Чем длительнее кипячение, тем больше диспергация. Например, Тищенко, применяя кипячение в течение 30 мин при механическом анализе песчаной почвы по методу Сабанина получил частиц  $< 0,01$  мм — 9,6%, при кипячении в течение двух часов — 13,8%. А. М. Васильев применял кипячение от 8 мин до двух суток. По мере увеличения времени кипячения выход илистой фракции

возрастал. При определении фракций по методу Сабанина суспензию кипятят один час, по методу Земятченского и Охотина — 12 час, при работе по методу Вильямса применяют двойное кипячение — 6 час для отделения песка и крупной пыли и 42 час — для диспергации более мелких частиц. Для проведения механического анализа по методу Качинского кипячение производят в течение одного часа и т. д.

**Взбалтывание почвенной суспензии вручную или на аппарате.** В лабораторной практике для взбалтывания применяют мешалку Вагнера, на ней можно осуществлять взбалтывание с помощью мотора. При наличии реостата регулируют число оборотов и получают необходимую интенсивность встряхивания.

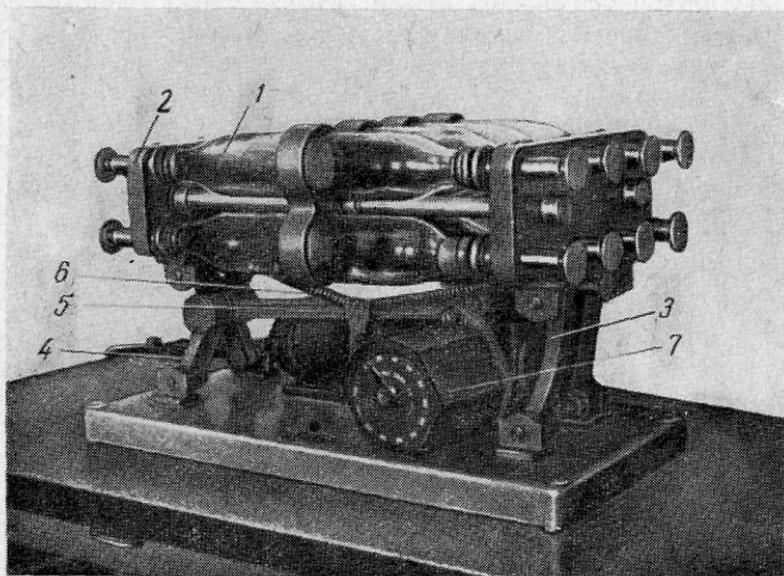


Рис. 2. Мешалка Качинского для горизонтального взбалтывания:  
 1 — стеклянные бутылки емкостью 0,5 л, 2 — каретка, 3, 4 — стойки, 5 — шатун,  
 6 — пружинный амортизатор, 7 — автотрансформатор ЛАТР-2

Наиболее совершенным аппаратом в настоящее время считается мешалка Качинского (рис. 2) для горизонтального взбалтывания. В ней суспензия взбалтывается в стеклянных бутылках (1), емкостью 0,5L, закрепляемых на каретке (2), качающейся между двумя стойками (3 и 4). Стойка (4) соединена с шатуном (5) кривошипно-шатунного механизма, приводимого в движение электродвигателем МУН  $\frac{100}{80}$  через червячный редуктор с передаточным числом 16. Для более плавной работы механизма в конструкции прибора предусмотрен пружинный

амортизатор (6). Электродвигатель с номинальным числом оборотов 2 000 питается от сети однофазного переменного тока напряжением в 127, 220 в. При 2 000 об/мин каретка делает 125 двойных ходов, при 1600 об/мин — 100. За один двойной ход перемещение каретки составляет 100 мм. Регулирование оборотов электродвигателя, а следовательно, и двойных ходов каретки производится автотрансформатором ЛАТР-2(7) путем изменения напряжения на зажимах электродвигателя. На шкале ЛАТР'а показано напряжение и соответствующее количество двойных ходов каретки.

Мешалка Качинского в 2—4 раза сильнее дезагрегирует почву, чем мешалка Вагнера. По данным А. Ф. Макаровой, двухчасовое взбалтывание на мешалке с горизонтальными толчками заменяет четырехчасовое, а для некоторых почв — восьмичасовое взбалтывание на мешалке Вагнера. Однако по сравнению с кипячением взбалтывание меньше дезагрегирует почву. В черноземных почвах, после подготовки по методу Качинского, одночасовое кипячение дало ила на 7—11%, глины — на 2—7% больше, чем часовое взбалтывание. В карбонатных почвах при кипячении прирост этих фракций соответственно был не больше 3—4%.

### **Химические и химико-механические методы**

Для дезагрегации почвы применяется ряд химических реагентов — кислоты и солевые растворы различных концентраций. Химические приемы воздействия на почву обычно применяют совместно с механическими и физическими способами в различных вариантах. К. К. Гедройц предложил диспергировать почву путем замены поглощенного кальция на натрий при обработке почвы нейтральным раствором NaCl. А. Н. Соколовский двухвалентные ионы в почве заменял на аммоний. Однако обработка почвы нейтральной солью натрия или аммония представляет собой операцию длительную, поэтому соли были заменены более быстродействующим реактивом — соляной кислотой (в различных концентрациях), которая совместно с другими реактивами нашла широкое применение в подготовке почв.

**Метод Качинского.** При подготовке карбонатной почвы для механического анализа по методу Качинского навеску почвы в 10 г обрабатывают 0,2 н. HCl до прекращения кипения, а затем, как и некарбонатную почву, обрабатывают 0,05 н. HCl до полного вытеснения кальция. Для удажения хлора почву промывают водой, затем переносят в колбу, куда прибавляют 250 мл воды и однонормальный раствор NaOH в количестве, эквивалентном емкости поглощения данной почвы — 1 мл на 10 м/экв емкости поглощения. После двухчасового стояния (при взбалтывании содержимого через каждые 15 мин) суспензию кипятят в течение одного часа. После кипячения приступают к анализу.

Метод Качинского в настоящее время широко распространен в Советском Союзе.

В 1950—1955 гг. в лаборатории физики почв МГУ метод Качинского был детально исследован сотрудниками А. Ф. Макаровой и В. Е. Корневской; результаты механического анализа при этом методе подготовки почвы были сравнены с данными анализа почв, подготовленных по международному методу «А», суданскому методу и методу Пури.

При этом было установлено, что в почвах, подготовленных по методу Качинского, наблюдается наибольшая диспергация, и результаты механического анализа для безгумусных почв примерно соответствуют данным анализа почв, подготовленных по международному методу «А»; для почв гумусных, подготовленных по методу Качинского, количество ила больше на величину гумуса.

**Международный метод «А».** Рекомендован конгрессом почвоведов в Вашингтоне для всеобщего употребления. Сущность процесса подготовки сводится к следующему: навеску почвы в 10 г помещают в стакан емкостью в 500 мл. Сжигают гумус перекисью водорода (в стакан приливают 50 мл 6%  $H_2O_2$ ).

Смесь перемешивают и выдерживают на кипящей бане до прекращения вспенивания массы. Реакция окисления гумуса длится около 12 час. Затем после охлаждения суспензии для разрушения карбонатов добавляют такое количество  $HCl$ , чтобы в объеме 250 мл концентрация ее не превысила 0,2 н.; в течение часа суспензию часто взбалтывают, после чего кислоту отмывают, почву через сито (диаметр отверстий 0,25 мм) просеивают в колбу емкостью 750—1000 мл, для диспергации и стабилизации прибавляют 50 мл 10%  $NH_4OH$ . Объем суспензии доводят до 500 мл, после чего суспензию взбалтывают в течение 24 час. Затем переносят в цилиндр, где объем суспензии доводят до литра и анализируют.

Метод «А» — громоздкий и длительный. Существенным недостатком его является сжигание гумуса, наиболее важной составной части почвы. Без гумуса нет почвы. Кроме того, стандартное количество диспергатора  $NH_4OH$  или  $NaOH$  для всех почв создает неодинаковые условия ввиду того, что анализируемые почвы имеют разную емкость поглощения.

Едкий натр лучше диспергирует почву, чем  $NH_4OH$ . По этим соображениям международный метод «А» в почвенной практике Советского Союза не привился. Его можно рекомендовать только в тех случаях, когда необходимо иметь данные механического состава безгумусных почв.

При пользовании этим методом в лаборатории физики почв МГУ вместо 50 мл 10%  $NH_4OH$  берут 4 мл 1 н.  $NaOH$  (замена  $NH_4OH$  на  $NaOH$  была рекомендована Международной конференцией по физике почв в Версале в 1934 г.), взбалтывание на мешалке Качинского производится в течение двух часов.

**Суданский, или содовый, метод.** При подготовке для механического анализа навеску почвы, высушенную при  $100^{\circ}\text{C}$ , обрабатывают при двухчасовом взбалтывании 2% раствором  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Затем производят отмучивание глинистой фракции в растворе 0,05%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . В лаборатории физики почв МГУ процесс подготовки несколько изменен: к воздушно-сухой почве прибавляют 100 мл 2%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , проба стоит 24 час (периодически суспензию взбалтывают); затем объем суспензии доводят до 250 мл и производят взбалтывание на мешалке Качинского в течение двух часов; после чего пробу переносят через сито (диаметр отверстий 0,25 мм) в литровый цилиндр и методом пипетки определяют выход фракций.

По сравнению с методом Качинского содовый метод дает в 3—4 раза меньше иловатой фракции и значительно больше мелкой и средней пыли. При подготовке почвы необходимо удалять карбонаты, так как без удаления карбонатов диспергировать почву на механические элементы с применением растворов соды не удавалось.

**Метод Пури.** Подготовку почвы по методу Пури производят следующим образом: навеску почвы в 10—20 г заливают 100—200 мл однонормального раствора  $\text{NaCl}$  и оставляют на 30 мин, периодически взбалтывая суспензию. Затем почву переносят на фильтр и обрабатывают 500 мл 1 н.  $\text{NaCl}$ , промывают 100 мл 0,1 н. раствором  $\text{NaCl}$ . Для удаления соли из пробы почву промывают 10 мл дистиллированной воды. После промывки почву переносят в бутылку, добавляют 500 мл воды и 5 мл 0,1 н.  $\text{NaOH}$  до получения щелочной реакции по бромтимолблау и взбалтывают в течение часа. Затем доводят объем суспензии до литра и анализируют пипетированием.

В лаборатории физики почв МГУ применяют другой вариант этого метода: 10 г почвы заливают 200 мл 1 н. раствора  $\text{NaCl}$ , эту пробу оставляют на 24 час, периодически взбалтывая суспензию вручную; затем почву переносят на фильтр и обрабатывают 0,1 н.  $\text{NaCl}$  и водой, согласно методу Пури, далее почву переносят в колбу вместимостью 500 мл, куда добавляют 250 мл воды и 25 мл раствора 0,1 н.  $\text{NaOH}$ . В течение часа суспензию взбалтывают на мешалке Качинского, потом переносят в литровый цилиндр (через сито с диаметром отверстий 0,25 мм), прибавляют еще 2,5 мл 0,1 н.  $\text{NaOH}$ , добавляют дистиллированной воды до литра и определяют механический состав методом пипетки.

Проведенные анализы почвы, подготовленной по методу Пури (вариант лаборатории физики почв МГУ), показали заниженное содержание ила в черноземах вскипающих и невскипающих, разница в содержании физической глины невысокая.

При подготовке почвы методом Пури разрушается только незначительная часть карбонатов. Потеря в весе для разных почв после обработки по методу Пури составляла 0,62—5,25%, тогда как по методу Качинского, в этих же почвах, потеря коле-

балась от 3 до 53%. Следовательно, карбонаты при работе по методу Пури участвуют в механическом анализе и распределяются по разным фракциям. Метод Пури можно рекомендовать для изучения распределения карбонатов по разным фракциям при обязательном сравнении данных с результатами механических анализов, в которых подготовка почвы шла по методу Качинского.

Таким образом, метод Пури перспективен для обработки карбонатных почв. Неудобство метода заключается в том, что при промывке почвы 0,1 н. NaCl в фильтрат идут органические вещества. Недостаток его — стандартное количество реактивов для всех почв, что создает неодинаковые условия дисперсии их.

### Подготовка карбонатных почв к механическому анализу

Подготовка карбонатных почв к механическому анализу — вопрос очень сложный и до сих пор окончательно не решенный.

С. С. Морозов, сравнивая разные способы подготовки, установил, что наилучшее диспергирование карбонатных почв дает метод Гедройца. Им составлена таблица распределения карбонатов по отдельным гранулометрическим фракциям для наиболее распространенных грунтов СССР. Из приведенных С. С. Морозовым данных следует, что нет никакой закономерности в распределении карбонатов по фракциям в разных грунтах. Для определения механического состава карбонатных почв он рекомендует целый ряд методов.

Оксалатный способ — диспергирование карбонатных почв щавелевокислым натрием  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ . Оксалат натрия концентрации 0,5 н. берется в одинарном, двойном или тройном количестве в зависимости от степени карбонатности, от величины емкости поглощения почвы. В табл. 6 даны нормы добавления 1 н. NaOH для разных почв, соответствующие одинарной емкости поглощения. Эти данные можно использовать и для 1 н. раствора  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ . Если концентрация раствора равна 0,5 н., количество вносимого раствора оксалата надо увеличить в 2 раза.

В лаборатории физики почв МГУ применялся такой вариант подготовки: 10 г почвы помещали в колбу, приливали 250 мл воды и раствора  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ , в количестве, равном одинарной емкости поглощения. Колбу с содержимым выдерживали два часа, после чего суспензию кипятили в течение часа. В некарбонатных почвах выход ила при такой подготовке был примерно такой же, как и при подготовке почв по методу Качинского без разности потери от обработки HCl, в карбонатных почвах выход ила был значительно меньше. При применении двойного или тройного количества  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$  от емкости поглощения содержание ила возрастало, а суспензия на 2—3-й день коагулировала. При действии на почву оксалата натрия так же, как

гексометофосфата  $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ , пирофосфата —  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ , которые сейчас начинают испытываться в почвенной практике, из почвы вытесняется не только поглощенный натрий, но в реакцию вступает и кальций карбонатов почвы. При этом натрий употребляемых солей образует соду, а кальций карбонатов, вступая в реакцию с кислотными остатками, дает нерастворимые соли, в результате чего в почве формируются новые механические элементы. Поэтому при работе с этими реагентами иногда наблюдается увеличение пылеватых частиц и мелкого песка.

В Средней Азии на сероземах, содержащих от 5 до 20% карбонатов, широко применяется метод диспергирования почвы с помощью  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ .

Описанный метод Качинского (стр. 14) применим и для карбонатных почв для суждения о дисперсности некарбонатной минеральной части почвы. Карбонаты в почве Н. А. Качинский разделяет на осажденные из водных растворов, которые почти всегда входят в состав фракции мелкой пыли и ила, и карбонаты органогенные — ракушечник, скелеты водорослей и т. п., которые входят в состав крупной пыли и песка и легко распознаются под микроскопом. Отмывка карбонатов при механическом анализе дает очень ценную добавочную характеристику почвы — потерю от обработки, которая указывает на количество главным образом карбонатов в почве.

В некоторых случаях обработка карбонатных почв путем декальцинирования соляной кислотой является необходимым приемом для установления изменений в минеральной части почвы процессами почвообразования. Только с помощью этого метода А. Н. Розанову удалось установить, что процесс сероземообразования сопровождается утяжелением (оглинением) механического состава почвенной толщи по сравнению с материнской породой.

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВ

**Определение механического состава визуально и на ощупь.** При описании почвы в полевых условиях необходимо давать характеристику гранулометрического состава, которая используется при картировании для выделения почвенных разностей и составления их производственной характеристики.

Обычно в этих условиях определение гранулометрического состава производится на глаз и на ощупь в сухом и влажном состоянии по следующим показателям: ощущение при растирании почвы на ладони, вид в лулу или простым глазом, состояние сухой и влажной почвы, отношение влажной почвы или грунта к скатыванию (см. табл. 2). Последний прием применяется особенно широко.

Берут 3—4 г почвы и увлажняют до рабочего состояния (густой пасты). Вода при этом из почвы не отжимается. Хорошо размятую и перемешанную в руках почву раскатывают на ла-

Показатели гранулометрического состава почвы для определения его визуально и на ощупь

Группа почв и грунтов по механическому составу	Ощущение при растирании почвы грунта на ладони	Вид в лупу и простым глазом	Состояние сухой почвы и грунта	Состояние влажной почвы и грунта	Отношение к скатыванию в шнур (рис. 3)
Пески	Ощущение песчаной массы	Состоит почти целиком из зерен песка	Сыпучие	При увлажнении образуют текучую массу «песок-пльвун»	Не скатывается в шнур (1)
Супеси	Неоднородные, ощущается песок (в основном) и слабосуглинок	Преобладают частицы песка, более мелкие являются примесью	Комья легко распадаются при надавливании рукой и при подкидывании на лопате	Непластичные	При раскатывании в шнур распадаются на мелкие кусочки (2)
Легкий суглинок	Неоднородный, значительное количество глинистых частиц	Преобладает песок, глинистых частиц 20—30%	Для разрушения комьев в руке требуется небольшое усилие	Слабо пластичный	При раскатывании образуется шнур, легко распадающийся на дольки (3)
Средний суглинок	Ощущается примерно одинаковое количество песка и глинистых частиц	Еще ясно видны песчаные частицы	Сухие комья с трудом разрушаются в руке	Пластичный	При раскатывании формируется сплошной шнур, который при свертывании в колечко распадается на дольки (4)
Тяжелый суглинок	Ощущается небольшая примесь песчаных частиц	Преобладают пылеватые глинистые частицы, песчаных почти нет	Сухие комья невозможно разрушить сжатием в руке	Хорошо пластичный	При раскатывании легко образуется шнур, в кольцо свертывается, но дает трещины (5)
Глина	Очень тонкая однородная масса, трудно растираемая в порошок	Однородный тонкий порошок, песчаных частиц нет	Образует твердые комья, не распадающиеся от удара молотка	Хорошо пластичная, липкая, мажущаяся масса	При раскатывании в шнур легко свертывается в колечко, не трескаясь (6)

дони в шнур, толщиной около 3 мм, и затем сворачивают в кольцо диаметром примерно в 3 см. В зависимости от механического состава почвы шнур при скатывании принимает различный вид (рис. 3). Эти приемы рекомендуют для работы в полевых условиях.

**Просеивание почвы на ситах.** Этот метод в настоящее время применяется главным образом для разделения частиц  $> 0,1$  мм, чаще же всего — для анализа скелетной части почвы. При этом, согласно рекомендации конференции по физике почв в Версале

(1934 г.), для просеивания скелетной части почв используют сита с круглыми отверстиями; мелкозем просеивают на проволочных или шелковых ситах с квадратными отверстиями, которые меньше забиваются почвой. Прием пригоден для анализа песчаных и каменистых почв.

Ход работы — в полевых условиях берут среднюю пробу 1—2 кг. Почву доводят до воздушно-сухого состояния, затем осторожно измельчают в ступке пестиком с резиновым наконечником с тем, чтобы не разрушать самих механических элементов, и просеивают через сито с диаметром отверстий в 1 мм. При

Механический состав	Морфология образца при испытании (вид в плане)
Шнур не образуется Песок	
Зачатки шнура Супесь	
Шнур, дробящийся при раскатывании Легкий суглинок	
Шнур сплошной, кольцо распадающееся при свертывании Средний суглинок	
Шнур сплошной, кольцо с трещинами Тяжелый суглинок	
Шнур сплошной, кольцо стойкое Глина	

Рис. 3. Показатели «мокрого» способа определения механического состава почв в поле (метод раскатывания)

этом из почвы удаляют корни. Определяют процентное содержание скелетной части и мелкозема. Если скелетная часть составляет 40% от веса навески, тогда на долю мелкозема приходится 60%. Для удаления приставших частиц, скелетную часть почвы замачивают водой из расчета 25 мл воды на 1 г. Затем почву кипятят в течение 1 часа, промывают на сите до просветления, высушивают, взвешивают и разделяют с помощью набора сит диаметром 1, 3, 5, 7 и 10 мм на фракции. Фракции взвешивают и вычисляют их процентное содержание.

Пример: в 1 кг навески вес скелетной части после промывки = 400 г, или 40%.

Вес фракции	в %
1—3 мм = 10 г	$\frac{10 \cdot 40 \cdot 100}{400 \cdot 100} = 1\%$
3—5 мм = 50 г	$\frac{50 \cdot 40 \cdot 100}{400 \cdot 100} = 5\%$
5—7 мм = 100 г	$\frac{100 \cdot 40 \cdot 100}{400 \cdot 100} = 10\%$
7—10 мм = 160 г	$\frac{160 \cdot 40 \cdot 100}{400 \cdot 100} = 16\%$
10 мм = 80 г	$\frac{80 \cdot 40 \cdot 100}{400 \cdot 100} = 8\%$

Механические элементы крупнее 10 мм представляют собою обломки первоначальной массивной горной породы, из которой образовалась почва. Частицы от 30 до 3 мм являются промежуточными продуктами распада горной породы. Они состоят обычно из отдельных минералов — полевого шпата, мусковита, биотита и т. д. Частицы от 3 до 0,05 мм состоят почти из чистого кварца.

После распределения скелетной части по фракциям почва классифицируется по степени каменности:

не каменистая — скелета	— 0,5%
слабокаменистая »	— 0,5—5%
среднекаменистая »	— 5—10%
сильнокаменистая »	— 5—10% (см. табл. 12).

По характеру скелетной части почвы бывают валунные, галечниковые и щебенчатые.

Мелкозем из данной пробы почвы собирают в склянку с притертой пробкой и анализируют одним из методов, приведенных ниже.

**Отмучивание частиц потоком воды разной скорости (по Шене).** В природе можно часто наблюдать разделение обломочного материала потоками воды разной скорости. Так, ручьи с большой скоростью течения несут с собою гальку, хрящ, медленно текущие — переносят мелкоземистый материал.

Во второй половине XIX столетия этот принцип был использован Е. Шене. Прибор (рис. 4), которым он пользовался, состоит из сосуда для воды — 1, конической воронки — 2 и пьезо-

метра—3 (стеклянной трубки, дважды согнутой под углом 45°), стакана для сбора отмучиваемой фракции — 4. Пьезометр через каучуковую пробку соединяется с широкой частью воронки. По высоте стояния воды в нем регулируют скорость движения потока. В перегибе пьезометра имеется отверстие, через которое отмучиваемые частички выходят в приемник. Е. Шене установил зависимость между диаметром частиц —  $D$ , подлежащих отмучиванию, и скоростью движения воды  $V$ , которая представлена в виде уравнения

$$D = 0,0314 \cdot V^{0,627} \quad (1)$$

Для частиц 0,05 мм скорость движения воды по этой формуле должна быть равна 2,08 мм/сек. При отмучивании струей воды

с такой скоростью частицы крупнее 0,05 мм останутся в воронке, а частицы менее 0,05 мм будут собраны в приемнике под пьезометром.

Необходимо установить количество воды, которое вытекает в отверстие пьезометра в одну секунду при скорости 2,08 мм/сек, а также уровень воды в пьезометре при этой скорости; высоту уровня поддерживают током воды, подаваемой из сосуда.

Метод применим для легких и песчаных почв. Н. М. Сибирцевым к этому методу была разработана двухчленная классификация почв по механическому составу (см. табл. 10).

Описанный метод широко использовался во второй половине XIX и в начале XX вв.

В настоящее время в практике он применяется очень редко.

**Методы отмучивания в стоячей воде.** Известно несколько методов отмучивания частиц почвы в стоячей воде. Наиболее известен метод Вильямса (1894) и метод двойного отмучивания Сабанина (1903). В основе обоих методов лежит различная ско-

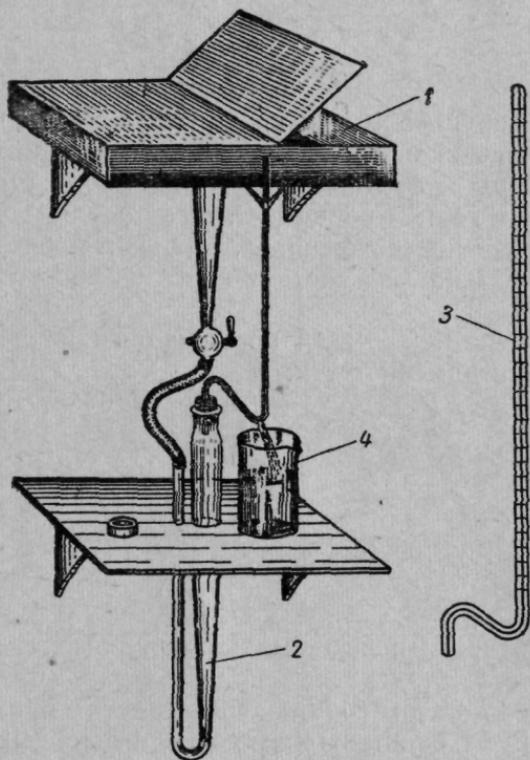


Рис. 4. Прибор Шене для механического анализа:

1—сосуд для воды, 2—коническая воронка, 3—пьезометр, 4—стакан для сбора отмучиваемых фракций

рость падения в воде частиц разного размера. В сосуде с суспензией в верхнем слое определенной высоты через некоторое время остаются частицы определенного диаметра, частицы больших размеров осядут на дно; если сливать суспензию через определенный промежуток времени, то отмучиваются частицы определенного размера; чем больше время отстаивания, тем мельче по размеру будут отмучиваться частицы.

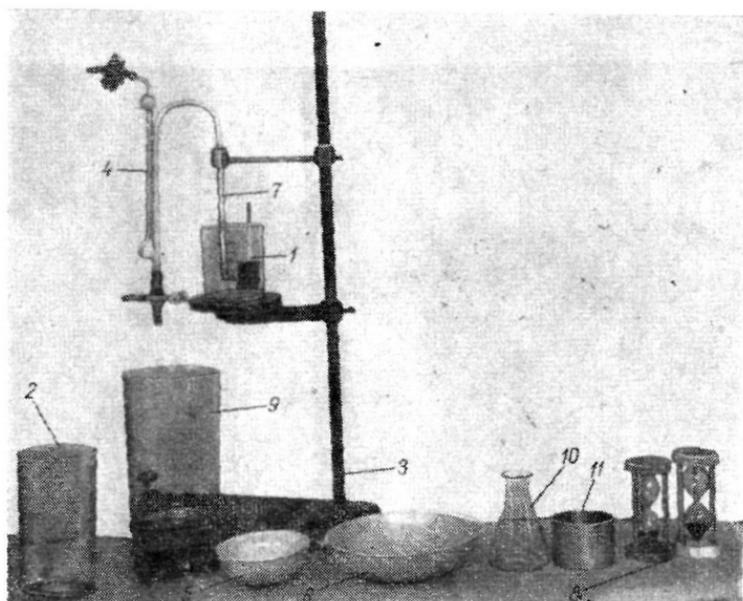


Рис. 5. Прибор Сабанина для механического анализа:

1 — малый стакан, 2 — большой стакан, 3 — штатив, 4 — сифон, 5 — малая фарфоровая чашка, 6 — большая фарфоровая чашка, 7 — мешалка, 8 — песочные часы, 9 — сосуд для сливания, 10 — колба для кипячения суспензии, 11 — сито

Метод Вильямса (1894) применяется мало, так как для отмучивания мелких фракций требуется много времени. Он громоздкий, требует много дистиллированной воды. Наиболее распространен метод двойного отмучивания Сабанина. Для двойного отмучивания применяется прибор Сабанина. Прибор (рис. 5) состоит из малого — 1 и большого стаканов — 2 и сифона — 4, которые монтируются на специальном штативе — 3, малой — 5 и большой — 6 фарфоровых чашек, мешалки — 7, 8 — песчаных часов на 30, и 100 сек и приемника — 9. Навеску почвы в 4 г помещают в эрленмейеровскую колбу и заливают шестикратным количеством воды; колбу с суспензией присоединяют к обратному холодильнику, после чего суспензию кипятят в течение часа. После охлаждения пробу переносят в большую фарфоровую чашку через сито с диаметром отверстий

0,25 мм. Осадок на сите протирают пальцем для удаления глины. Промытый песок — фракцию 0,25—1 мм — переносят в сушильный стаканчик и высушивают до постоянного веса. Подготовив таким образом почву, начинают разделение частиц <0,25 мм — предварительное в фарфоровых чашках и окончательное в стеклянных стаканах или цилиндрах, отчего метод и получил название двойного отмучивания. Перед отмучиванием необходимо установить прибор в рабочее состояние. Для этого проверяют горизонтальность верхней и нижней площадок штатива (с помощью уровня) и исправность сифона.

На верхнюю площадку ставят малый стакан с делениями от 1 до 4 см. Наливают в него воду, опускают сифон так, чтобы нижний конец его был на глубине 2 см от поверхности воды и сливают слой воды от 4 до 2 см. После проверки приступают к анализу.

Суспензию в большой чашке взмучивают и через 30 сек переносят в малую фарфоровую чашку, из малой фарфоровой чашки через 60 сек после взмучивания ее переносят в малый стакан, а чашки вновь доливают дистиллированной водой. Из малого стакана через 100 сек после взмучивания сливают слой суспензии от 4 до 2 см. За это время частицы крупнее 0,01 мм, имеющие скорость 0,2 мм/сек, пройдут слой в 2 см, частицы менее 0,01 мм, падающие с меньшей скоростью, будут находиться во взвешенном состоянии. Таким образом, при сливании слоя от 4 до 2 см в стакан удаляются частицы менее 0,01 мм. Отмучивание суспензии через установленные сроки ведется до тех пор, пока жидкость в чашках и в стакане (слой от 4 до 2 см) станет прозрачной. При этом необходимо, после 2—3 сливаний, почву в чашке подвергать растиранию пальцем с резиновым колпаком или каучуковым пестиком.

После отмучивания почву из чашек переносят в стакан, делают 1—2 контрольных сливания и затем почву переносят в большой стакан прибора Сабанина. Устанавливают сифон в стакане на глубине 6 см от поверхности суспензии и наливают воду до отметки 12 см. При такой установке прибора производят проверку на чистоту отделения частиц <0,01 мм, для чего суспензию взмучивают и наблюдают за просветлением. Если через 300 сек слой жидкости от 12 до 6 см будет прозрачным, то частицы <0,01 мм отделены полностью. В противном случае производят отмучивание через 300 сек до просветления указанного слоя воды.

В дальнейшем частицы <0,01 мм, собранные в стакане, или разделяются на фракции с помощью метода-пипетки или выбрасываются. Оставшаяся после отмучивания частиц <0,01 мм почва в стакане состоит из фракции мелкого песка 0,25—0,05 мм и крупной пыли 0,05—0,01 мм. Они разделяются отмучиванием слоя от 12 до 6 см через 30 сек. За это время частицы >0,05 мм, падающие со скоростью 2 мм/сек, пройдут слой толщиной 6 см,

частицы  $< 0,05$  мм, находясь во взвешенном состоянии, будут сливаться в приемник. Отмучивание ведут до просветления слоя 12—6 см. Почву из большого и малого стаканов переносят в сушильные стаканчики, высушивают до постоянного веса и вычисляют в процентах к весу абсолютно сухой навески.

В результате анализа выделяют следующие фракции:

1—0,25 мм на сите,

0,25—0,05 мм — в большом стакане прибора Сабанина при отмучивании суспензии через 30 сек;

0,05—0,01 мм — в стакане приемника при этом же отмучивании

и  $< 0,01$  мм — фракция в стакане приемника при отмучивании через 100 сек определяется обычно по разности, путем вычитания из 100 суммы процентов первых трех фракций.

Результат анализа записывается по форме табл 3

Таблица 3

Данные механического анализа почвы (грунта)  
по методу Сабанина в % от веса сухой почвы

Горизонт и глубина в см	Гигроск. влажн. в %	Размеры частиц в мм				
		$> 1$	1—0,25	0,25—0,05	0,05—0,01	$< 0,01$

Метод Сабанина применяется для почв легкого механического состава, где содержание физической глины не превышает 10—15%. В сочетании с ситовым методом он может быть рекомендован для песчано-гравелистых или щебенчатых почв и грунтов.

Мелкозернистые почвы и грунты, как показали исследования М. М. Филатова (1925), при этом методе утяжеляются за счет засасывания сифоном суспензии с глубин больших, чем те, на которых его устанавливают.

В настоящее время метод двойного отмучивания Сабанина применяется со многими дополнениями. М. М. Филатов усовершенствовал прибор Сабанина: при отмучивании через определенный срок на заданную глубину опускают не сифон, а полый цилиндр с диафрагмой, которая закрывается по прошествии времени. Цилиндр извлекают из стакана, и суспензию сливают из него в банку.

На кафедре почвоведения Ташкентского университета проф. А. М. Орлов приспособил прибор Сабанина для массовых анализов. Изменения здесь сводятся к следующему: стаканы для отмучивания и стаканы-приемники устанавливают на полках

деревянной рамы один против другого. На раме смонтировано приспособление для взбалтывания суспензии, одновременного опускания сифонов во все стаканы и сливания суспензии в приемники, автоматизирована подача воды в стаканы. На конце сифона, погружаемого в стакан, впаяна сетка. Когда сифон поднимают из воды, то в силу поверхностного натяжения водных пленок на сетке вода из сифона не выливается. Все это упрощает и ускоряет работу. Поэтому при массовых анализах целесообразно пользоваться этими приспособлениями. После анализа по методу Сабанина группу механического состава почвы устанавливают по классификации Н. М. Сибирцева (см. табл. 10) или Н. А. Качинского (см. табл. 11), если применялась подготовка почвы по его методу и использовались скорости падения частиц в воде по Стоксу.

**Выделение из почв и грунтов фракций различного размера отмучиванием.** При изучении физических и химических свойств частиц различного размера, слагающих почву, а также при определении минералогического состава, необходимо из почвы выделить в большом количестве фракции различного размера. Дезагрегацию почвы производят методом мокрого растирания или химическим путем по методу Качинского. Метод мокрого растирания применим к дерново-подзолистым, серым лесным почвам и некарбонатным черноземам. Для расчленения и выделения фракцией менее 0,25 мм применяют отмучивание, как в методе Сабанина. Скорости падения частиц в воде рассчитывают по формуле Стокса (приложение, табл. 1).

Для выделения частиц различного размера берут навеску почвы от 50 до 500 г в зависимости от того, какое количество (по весу) частиц необходимо получить. Для минералогического анализа достаточно 50 г, для изучения физических свойств и химического состава почвенных частиц берут большие навески. При этом нужно иметь в виду, что концентрация суспензии в сосуде для отмучивания должна быть не более 3%. В случае сильно засоленных почв (солончаки) в отдельной навеске путем промывки водой пробы в 20 г — до прекращения реакции на  $\text{Cl}$  и  $\text{SO}_4$  — определяют количество легко растворимых солей. По разности веса сухой почвы до и после промывки определяют потерю веса за счет легко растворимых солей. По методу растирания навеску почвы, увлажненную до состояния густой пасты, растирают в течение 30 мин в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником. Затем добавляют дистиллированную воду (до жидкого состояния) и переносят почву на сито с отверстием 0,25 мм. Собранный на сите фракцию 1—0,25 мм отмывают при легком растирании от глинистых частиц до тех пор, пока с сита будет идти совершенно прозрачная вода. Затем частицы с сита помещают в стаканчик и высушивают. Так собирают и определяют средний и крупный песок 1—0,25 мм.

Установка для отмучивания дана на рис. 6.

Отмучивание частиц  $< 0,001$  мм. После растирания влажной почвы в чашке в нее добавляют дистиллированную воду, суспензию для отмучивания переносят в цилиндр путем сливания. Перед каждым сливанием почву в чашке растирают с небольшим количеством воды пестиком с резиновым наконечником и оставляют на 10 мин.

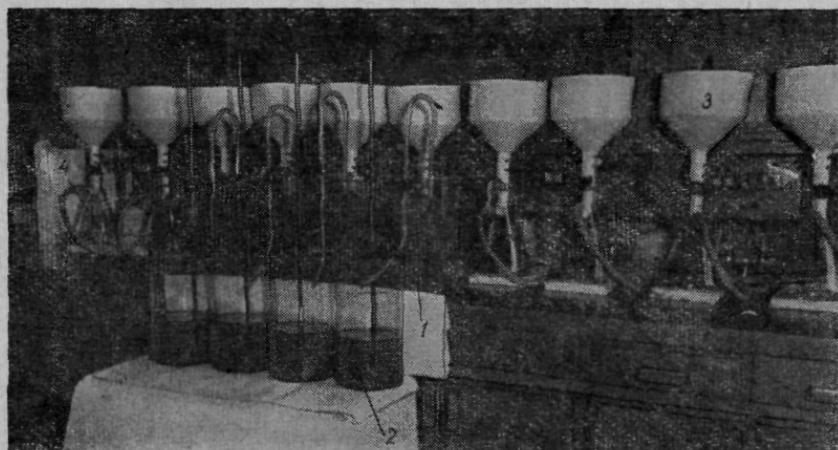


Рис. 6. Установка для отмучивания различных фракций механических элементов:

1 — сосуд для отмучивания, 2 — сосуд для сбора фракций суспензии, 3 — фарфоровая воронка с сетчатым дном, 4 — колба Бунзена, соединенная с насосом

После этого срока крупные частицы осядут на дно, не осевшие за этот срок частицы нужно перенести в цилиндр. Для отмучивания берут сосуд высотой 35 см, в диаметре около 10 см, с общей емкостью в 3,5 л; на сосуд наносят черту, до которой впоследствии наливают воду; другую черту проводят на 7 см ниже первой отметки, до которой сливают суспензию при отмучивании частиц  $< 0,001$  мм. Сифон для сливания суспензии должен иметь боковые отверстия для всасывания, как в пипетке для механического анализа, или же его конец должен быть загнут кверху под углом  $45^\circ$  с тем, чтобы не происходило засасывание суспензии с глубины более 7 см. На расстоянии 7 см от нижнего конца на сифон надевают резиновое колечко для погружения его на заданную глубину.

Отстаивание суспензии при отмучивании частиц  $< 0,001$  мм длится около суток. В начале, середине и в конце срока отмечают температуру суспензии, для чего рядом ставится цилиндр с термометром. Из трех отсчетов выводят среднюю температуру и затем по табл. 8 устанавливают точно срок сливания

суспензии. При одном сливании фракции  $< 0,001$  мм получают около 500 мл суспензии. Для полного удаления частиц ила требуется 10—20, а то и более сливаний. После каждого сливания цилиндр вновь доливают суспензией из фарфоровой чашки. И так продолжают до тех пор, пока в чашке слой воды над осадком не станет прозрачным. После этого содержимое чашки переносят в цилиндр, где отмучивание продолжают до тех пор, пока не наступит просветление слоя от поверхности до 7 см. Для выделения частиц  $< 0,001$  мм из воды собранную суспензию фильтруют через воронку Бюхнера под вакуумом. На дно воронки помещают подкладку из сатина, на нее кладут плотный фильтр (синяя обмотка или бумага для хроматографического анализа); воронку вставляют в толстостенную колбу конической формы (колба Бунзена), к отростку которой присоединяют водоструйный насос, создающий разрежение внутри колбы. При хорошей герметичности вакуум держится несколько часов без работы насоса. Первые мутные порции фильтрата возвращают снова на фильтр. Когда фильтрация сильно замедляется вследствие накопления осадка, последний снимают с воронки. Для этого колбу отъединяют от насоса, фильтрат сливают, с воронки снимают фильтр с осадком. Осадок переносят в фарфоровую чашку. В воронку вставляют новый фильтр в случае разрушения старого, и фильтрация продолжается. Накопившийся осадок можно соскрести ложечкой в фарфоровую чашку, чтобы избежать затраты времени на заиливание нового фильтра, что происходит довольно медленно. Осадок частиц  $< 0,001$  мм доводят до воздушно-сухого состояния, растирают в фарфоровой ступке, просеивают через сито 0,1 мм и хранят в стеклянной банке, откуда и берут навески ила для анализа.

Осаждение ила коагуляцией. Выделение из суспензии ила путем фильтрации — операция длительная. Для некоторых определений минералогического состава, теплоемкости и др. ил из суспензии можно выделить электролитами. Для этого после каждого сливания в суспензию добавляют 2—3 капли крепкой  $\text{HCl}$ . Частицы почвы коагулируют. Просветленную жидкость сливают; следующее сливание делают в этот же сосуд. После отмучивания ила осадок промывают дистиллированной водой путем декантации до тех пор, пока гель осадка не перейдет в золь. Для этого обычно требуется 3—5 промываний. Затем воду из осадка удаляют путем выпаривания на водяной бане до тестообразного состояния. Осадок досушивают на воздухе, растирают в ступке, просеивают через сито с отверстиями 0,1 мм и хранят в стеклянной банке с притертой пробкой.

Выделение частиц 0,005—0,001 мм. Оставшийся после выделения частиц ила ( $< 0,001$  мм) осадок в сосуде взмучивают через час с минутами (точно время сливания устанавливают по температуре суспензии с помощью табл. 8), сливают

слой суспензии в 10 см. После отмучивания суспензия отстаивается, прозрачную воду сливают и осадок подсушивают.

**Выделение частиц 0,01—0,005 мм.** Отмучивание ведется в том же порядке. После удаления частиц  $< 0,005$ — $0,001$  мм из цилиндра, осадок взмучивают и через 17 мин сливают слой суспензии в 10 см. Точно срок сливания устанавливается по температуре суспензии (табл. 8). После отстаивания слитой суспензии слой прозрачной воды сливают. Собрав всю фракцию в приемнике, осадок профильтровывают и сушат на воздухе.

**Выделение частиц 0,05—0,01 мм.** Ход работы такой же, как и при выделении предыдущих фракций. Сливают слой в 25 см через 100 сек. Точно срок сливания устанавливают по табл. 8.

В цилиндре после отмучивания последней фракции останутся частицы 0,25—0,05 мм.

В результате описанных работ выделяются шесть фракций:

1—0,25 мм	0,01—0,005 мм
0,25—0,05 мм	0,005—0,001 мм
0,05—0,01 мм	$< 0,001$ мм

Для изучения физических, физико-химических свойств, химического и минералогического состава нужно иметь около 50—100 г каждой фракции. Для минералогического состава достаточно по 5—10 г каждой фракции.

Подготовка почвы методом растирания применима не для всех почв; для карбонатных и гипсовых горизонтов почв и грунтов, для почв красноземного типа с подвижными полуторными окислами требуется химический метод подготовки.

Вследствие наличия в этих почвах сильных коагуляторов почти невозможно выделить мелкие фракции, так как суспензии быстро свертываются. В таком случае применяют метод химической обработки почвы по Н. А. Качинскому.

Навеску почвы обрабатывают 0,2 н. HCl до прекращения выделения пузырьков CO<sub>2</sub>. Декантацией раствора над почвой переносят на фильтр. После разрушения карбонатов почву переносят в воронку и обрабатывают 0,05 н. HCl до исчезновения в фильтрате реакции на Са. Затем соляную кислоту из почвы отмывают водой, почву с фильтра переносят в фарфоровую чашку, растирают в течение 30 мин. Далее разделение осуществляется так, как описано выше.

**Ареометрический метод.** Ареометрический метод был предложен Буйюкосом в 1927 г. Метод основан на измерении удельного веса суспензии изменяющегося во времени по мере оседания частиц сначала крупных, а потом все более мелких (т. е. удельный вес суспензии постепенно уменьшается). Для определения

плотности суспензии применяется стеклянный ареометр конструкции Казагранда (рис. 7), на шкале которого нанесены деления от 0,995 до 1,030 с точностью до 0,001, отсчеты берутся на глаз с точностью до 0,0001. Длина стержня ареометра 14—16 см, диаметр 0,05 см. Длина луковицы ареометра — 15—17 см, диаметр — 3 см. Градуировка ареометра производится при 20°C. Плотность воды при этой температуре приравнивается к единице. Для удобства в работе и при расчетах берется упрощенный отсчет: отбрасывается единица, а запятая переносится на три знака вправо, например, отсчет 1,0462 записывается как 46,2 (*R*).

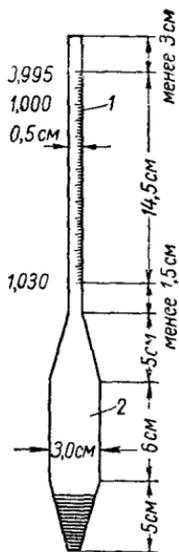


Рис. 7. Ареометр для определения плотности суспензии: 1 — стержень ареометра, 2 — луковица ареометра

Поправка на мениск ( $\Delta R$ ). Ареометр градуируется по нижнему мениску, но вследствие непрозрачности суспензии отсчеты приходится производить по верхнему краю мениска. Поэтому перед началом работы устанавливают поправку на мениск путем погружения ареометра в дистиллированную воду при 20°C. Берется отсчет по нижнему и верхнему мениску и разница умножается на 1000. Например: отсчет по нижнему краю мениска — 0,9990, по верхнему 0,9986.

Искомая поправка =  $0,9990 - 0,9986 = 0,0004 \cdot 1000 = 0,4$ . Полученная поправка на мениск 0,4 является постоянной для данного ареометра и прибавляется к каждому отсчету.

Поправка на температуру. На показания ареометра оказывает влияние температура суспензии. Разница температур в 2°C дает ошибку в определении около 2%. Поэтому необходимо весь анализ вести при одной температуре или точно замерять ее с тем, чтобы по табл. 4 определить температурную поправку. При температуре суспензии более 20°C поправка прибавляется, при температуре менее 20°C поправка вычитается из показаний ареометра (см. табл. 4).

При измерении плотности суспензии ареометром необходимо помнить, что:

1. На луковице ареометра могут оседать частицы почвы. Количество осадка зависит от времени нахождения ареометра в суспензии, от концентрации суспензии и, в значительной степени, от характера почвы. Во избежание ошибки от оседания частиц на луковицу ареометра отсчет не должен занимать более 5—10 сек, а ареометр после отсчета необходимо вынимать из суспензии и очищать от осевших частиц грунта.

2. Концентрация суспензии не должна превышать 30 г/л, в противном случае закон Стокса не применим.

Шкала поправок на температуру к отсчету ареометра

Температура суспензии в градусах С	Поправка к отсчету по ареометру вычитается	Температура суспензии в градусах С	Поправка к отсчету по ареометру прибавляется
10	1,2	20,0	0,0
10	1,2	20,5	0,1
11	1,2	21,0	0,2
11	1,1	21,5	0,3
12	1,1	22,0	0,4
12	1,0	22,5	0,5
13	1,0	23,0	0,6
13	0,9	23,5	0,7
13,5	0,9	24,0	0,8
14,0	0,9	24,5	0,9
14,5	0,8	25,0	1,0
15,0	0,8	25,5	1,1
15,5	0,7	26,0	1,3
16,0	0,6	26,5	1,4
16,5	0,6	27,0	1,5
17,0	0,5	27,5	1,6
17,5	0,4	28,0	1,8
18,0	0,3	28,5	1,9
18,5	0,3	29,0	2,1
19,0	0,2	29,5	2,2
19,5	0,1	30,0	2,3
20,0	0,0	35,0	—

3. Опыты нужно вести в цилиндрах диаметром не менее 6 см.

Ход анализа. Берут навеску почвы в 30 г. Подготовку почвы к анализу проводят по методу Качинского. После кипячения суспензию переносят в литровый цилиндр через сито (с отверстиями диаметром 0,25 мм), доводят до температуры лаборатории, взбалтывают в течение минуты и через 20 сек в цилиндр опускают ареометр. Он должен свободно плавать. Через 10 сек производят первый отсчет. Следующие показания берут через 2—3 мин, после чего ареометр вынимают из суспензии и ополаскивают. Дальнейшие замеры производят через 5, 15, 30, 60 мин, а затем через 6, 24, 48 час. Ареометр опускают в цилиндр за

10—15 сек до срока отсчета, после отсчета вынимают и до следующего замера держат в цилиндре с водой.

Ниже приводится форма записи при работе с ареометром.

Таблица 5

Дата работы	Почва	Абс. сух. навеска почвы	Темп. суспензии в °С	Время начала анализа	Время, протекшее с начала анализа	Первонач. показ. ареометра $R_0$	Показ. ареометра + погр. на мениск $R_0 + \Delta R$	Показ. ареометра + погр. на темп. и мениск	Диаметр частиц в мм $D$	Частич данного размера и меньше в % $W$

Определение диаметра и количества частиц.

При вычислении диаметра частиц пользуются формулой

Стокса:

$$V = \frac{2}{9} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot 981 \frac{d_1 - d}{\eta}, \quad (2)$$

где:  $V$  — скорость падения частиц в см/сек;

$D$  — диаметр частиц в см;

$d_1$  — удельный вес твердой фазы почвы;

$d$  — удельный вес воды;

$\eta$  — вязкость воды в пузах при температуре опыта.

Выражая диаметр в мм, можем написать:

$$D^2 = V \frac{\eta \cdot 4 \cdot 9 \cdot 100}{(d_1 - d_2) \cdot 981 \cdot 2} = \frac{V \eta \cdot 1800}{(d_1 - d) \cdot 981}.$$

Принимая

$$\frac{\eta \cdot 1800}{(d_1 - d) \cdot 981} = A,$$

получим

$$D = \sqrt{A \cdot V}, \quad (3)$$

где

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

$H$  — путь частиц в см;  $T$  — время падения частиц в сек.

Определение диаметра частиц производят графически. Для этой цели предложена номограмма, в которой отдельные составляющие формулы Стокса представлены в виде прямых (рис. 8).

Прямая № 1 — подкоренное выражение  $A \cdot 10^3$ .

Прямая № 2 — температура ( $t$ ) суспензии.

Прямая № 3 — удельный вес  $d_1$  твердой фазы почвы.

Прямая № 4 — диаметр ( $D$ ) частиц почвы в мм.

Прямая № 5 — скорость ( $V$ ) падения частиц в см/сек.

Прямая № 6 — интервал времени ( $T$ ) отсчета по ареометру.

Прямая № 7 — правая сторона —  $R$  — тысячные деления ареометра, отмеченные у поверхности суспензии, при всех возможных погружениях ареометра; левая сторона  $H_R$  — расстояние в см от поверхности суспензии до центра водоизмещения, получающееся при погружениях ареометра и отвечающее пути, проходимому частицей от поверхности до центра ареометра.

Шкала  $R$  и соответствующая  $H_R$  в см вычисляется для каждого ареометра отдельно и зависит от размеров его частей.

$$H_{R_s} = \frac{(N - R)l}{N} + a - \frac{V_0}{2F}, \text{ где} \quad (4)$$

$N$  — число тысячных делений ареометра — 30;

$R$  — число тысячных делений на шкале ареометра от 1,000 до поверхности суспензий;

$l$  — длина шкалы от нижнего деления ареометра 1,030 до 1,000 — величина постоянная для ареометра;

$a$  — расстояние от нижнего деления ареометра 1,030 до центра; водоизмещение луковицы ареометра в см — величина постоянная для данного ареометра;

$V_0$  — объем луковицы ареометра до деления 1,030 на шкале;

$F$  — площадь сечения цилиндра, в котором производится анализ.

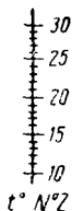
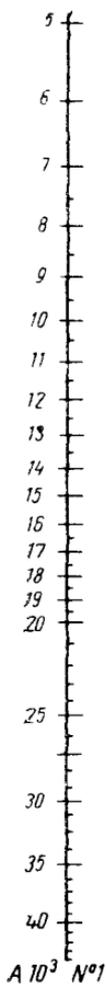
Определение величин, входящих в формулу 4. Объем луковицы ареометра  $V_0$  определяют в градуированном цилиндре емкостью 1000 — 500 см<sup>3</sup>, высотой около 40 см, диаметром 6 см. Для этого в цилиндр наливают 900 — 400 мл дистиллированной воды (по нижнему мениску), имеющей  $t = 20^\circ\text{C}$ . В цилиндр опускают ареометр до деления 1,030 (по верхнему краю мениска), отмечают увеличение объема, например:  $964 - 900 = 64 \text{ см}^3$ , что и будет соответствовать  $V_0$

$$\frac{V_0}{2} = 32 \text{ см}^3.$$

Вновь ареометр погружают в воду до тех пор, пока объем воды, вытесненный ареометром, не будет равен 32, тогда центр водоизмещения луковицы будет находиться на поверхности и величина  $a$  будет равна расстоянию от поверхности воды до нижнего деления ареометра 1,030, которое замеряют с помощью линейки. Пусть  $a = 9,5 \text{ см}$ .

Величина  $l$  — расстояние в см от верхнего деления ареометра 1,000 до нижнего 1,030, измеряется непосредственно —  $l = 10,15$ .

Величина  $N$  — постоянная для данного ареометра и в нашем случае равна 30.

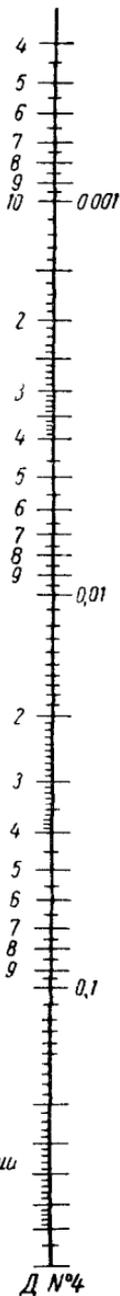
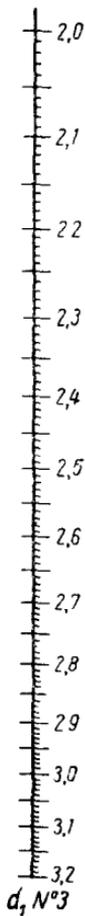


- $d_1 - N^{\circ}3$
- $H_R - N^{\circ}7$
- $T - N^{\circ}6$
- $V - N^{\circ}5$
- $D - N^{\circ}4$
- $t^{\circ} - N^{\circ}2$
- $A 10^3 - N^{\circ}1$

$$A = \frac{\eta \cdot 1800}{(d_1 \cdot d) \cdot 981}$$

**Экспликация**

- $\eta$  - вязкость воды в пуазах
- $d_1$  - удельный вес твердой фазы почвы
- $d$  - Плотность воды
- $H_R$  - высота в см от поверхности суспензии
- $T$  - время в сек до центра ареометра
- $V$  - скорость в см/сек
- $D$  - Диаметр зерен в мм
- $t^{\circ}$  - Температура в градусах С
- $A$  - Отсчет по ареометру



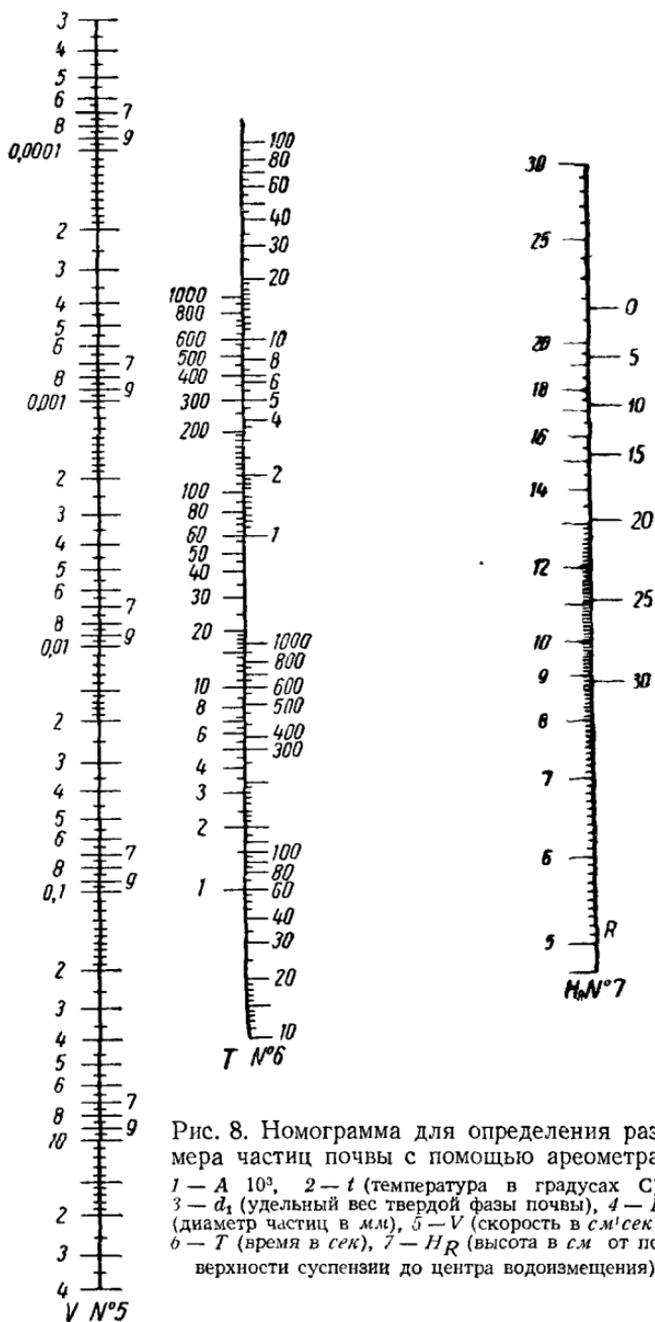


Рис. 8. Номограмма для определения размера частиц почвы с помощью ареометра: 1 —  $A 10^3$ , 2 —  $t$  (температура в градусах С), 3 —  $d_1$  (удельный вес твердой фазы почвы), 4 —  $D$  (диаметр частиц в мм), 5 —  $V$  (скорость в см/сек), 6 —  $T$  (время в сек), 7 —  $H_R$  (высота в см от поверхности суспензии до центра водоизмещения)

Площадь цилиндра

$$F = \frac{\pi D^2}{4} \text{ см}^2,$$

где  $D$  — внутренний диаметр цилиндра = 6 см:

$$F = \frac{3,14 \cdot 36}{4} = 28,26 \text{ см}^2$$

$R$  — число переменное и соответствует количеству тысячных долей по шкале ареометра от уровня суспензии до деления 1,000. Пусть  $R = 29$ .

Подставляя в формулу 4 значения определенных величин, получим:

$$H_R = \frac{(30 - 29)}{30} \cdot 10,15 + 9,5 - \frac{64}{56,52}.$$

Беря различные значения  $R$  (от 1,000 до 1,030), определяем соответствующие им величины  $H_R$  — пути, проходимые частицами при любом погружении ареометра. Наносим на правую сторону прямой № 7 величины  $R$ , а соответствующие им значения  $H_R$  — на левую сторону прямой, получаем полностью прямую № 7 для номограммы.

Пользование номограммой (рис. 8). Пусть удельный вес твердой фазы почвы = 2,75, а температура суспензии 18°C, время от начала опыта 30 мин и показание ареометра с поправкой на температуру и мениск = 20,35 ( $R$ ). Для определения диаметра частиц, не осевших через 30 мин, берется линейка и накладывается на прямую № 3 в точке 2,75 так, чтобы линейка проходила через 18°C на прямой № 2 и пересекла прямую № 1. Точка пересечения = 11,0, что отвечает подкоренному значению  $A \cdot 10^3$ .

Для определения скорости падения частиц в см/сек на прямой № 7 отыскиваем точку 20,35, накладываем на нее линейку так, чтобы она прошла через прямую № 6 в 30 мин и тогда на пересечении линейки с прямой № 5 получим скорость падения частиц = 0,0080 см/сек =  $V$ .

Соединяя эту точку с точкой на прямой № 1 = 11,0, определим диаметр частиц данного замера = 0,0110 мм по прямой № 4.

Вычисление процентного содержания фракций производится по формуле:

$$B\% = \frac{d_1}{d_1 - d} \cdot \frac{100}{m} R, \quad (5)$$

где  $B$  — процент фракции менее данного размера;

$d_1$  — удельный вес твердой фазы почвы;

$d$  — плотность воды;

$m$  — абсолютно-сухая навеска — 30 г;

$R$  — отсчет по ареометру с поправкой на мениск и температуру.

Часть формулы  $\frac{d_1}{d_1 \cdot d} \cdot \frac{100}{m} = \text{const}$ ,

для данного анализа почвы:

$$\frac{2,75}{2,75 - 1} \cdot \frac{100}{30} = K.$$

Тогда

$$B\% = RK = 20,35 \cdot K. \quad (6)$$

Сравнительное изучение ареометрического метода и пипет-метода по Качинскому, Кочериной, Макаровой и Платовой, Корневской показало, что при определении по ареометру количество мелкого песка завышено, вследствие оседания частиц на плечи ареометра во время опыта.

Ареометр дает неточные показания при определении илистой фракции, особенно при начальной плотности суспензии в 1%. Увеличение концентрации суспензии до 3% увеличивает точность определения крупных фракций. Удовлетворительная сходимость данных сравниваемых методов наблюдалась для почв тяжело- и среднесуглинистых; большие расхождения для глин и супесей.

Ареометр неустойчив в суспензии. Повторное погружение его при замере плотности через различные интервалы времени вызывает дополнительное нарушение спокойного состояния суспензии, что влияет на результаты анализа.

В дальнейшем при разработке этого метода необходимо заняться вопросами реконструкции ареометра с целью повышения его чувствительности к малым концентрациям суспензии, устойчивости и уменьшения накопления осадка на плечах.

По сравнению с методом пипетки ареометрический метод менее трудоемкий. Ввиду того, что подготовка в этом методе осуществляется по методу Качинского, при характеристике почв следует пользоваться классификацией того же автора.

**Седиментометрический метод.** Седиментометрический метод (А. А. Фигуровского) основан на взвешивании осадка, накопи-

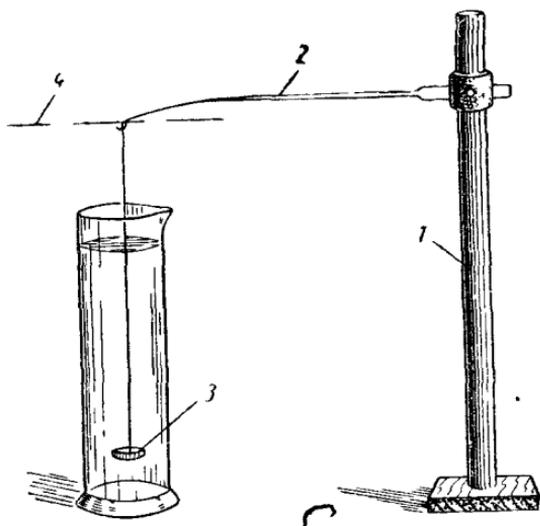


Рис. 9. Седиментометрические стеклянные весы Фигуровского:

1 — штатив, 2 — стеклянное или кварцевое коромысло, 3 — стеклянная чашечка для осадка, 4 — ось микроскопа

вающегося на пластинке внутри столба суспензии за определенный промежуток времени. Впервые этот принцип использовал Г. Ф. Нефедов (1902).

В 1925 г. Свен-Оденом сконструированы автоматические седиментационные весы и предложен метод определения гранулометрического состава по кривым накопления осадка на чашке весов. Более простое устройство имеют автоматические весы Стародубцева и пружинные Неверы и Холмса.

В последнее время широкое применение получили стеклянные весы Фигуровского, основанные на принципе гидростатического взвешивания осадка.

Весы (рис. 9) состоят из штатива (1), к которому прикреплено стеклянное или кварцевое коромысло (2); оно имеет длину 20—50 см. Толщина его вначале 2—3 мм, постепенно к концу уменьшается до 0,2—0,3 мм. На конец коромысла подвешена стеклянная чашечка (3) диаметром 3 см, с высотой бортиков — 5 мм.

В качестве отсчетного приспособления используют горизонтально поставленный микроскоп, снабженный окулярной шкалой.

Перед анализом делают проверку коромысла — оно не должно прогибаться под действием собственного веса и веса пустой чашки. Для проверки чашку подвешивают к коромыслу сначала в воздухе, а потом в воде. Положение конца коромысла, наблюдаемое в микроскопе, при этом не должно меняться. Чашку нагружают гирьками разновеса ( $Q$ ) и измеряют прогиб коромысла ( $q$ ). Зависимость прогиба от нагрузки прямолинейна и подчиняется закону Гука:

$$q = Q \cdot K, \quad (7)$$

где  $K$  — постоянная прибора.

Для вычисления процентного содержания частиц различного размера строится кривая осаждения частиц полидисперсной системы (рис. 10).

По оси абсцисс откладывается время  $t$ , по оси ординат величина  $Q$  — пропорциональная показанию микрометра. До момента выпадения самой крупной фракции кривая распределения имеет вид прямой, затем по мере оседания фракций она принимает форму пологой параболы.

Когда на чашку весов осядет все взвешенное вещество ( $Q$ ), кривая распределения перейдет в прямую, параллельную оси абсцисс.

По кривой распределения (рис. 10) можно определить вес фракции и ее процентное содержание. Для этого на кривой выделяют ряд точек  $M_0, M_1$  и т. д., проводят касательные к этим точкам и продолжают их до пересечения с ординатой. Отрезки ординаты между двумя касательными соответствуют количеству вещества, осевшему за определенный промежуток времени, например  $L_1 - L_2$  — количество фракции, выпавшей за время

$t_2 - t_1$ . Процентное содержание фракции —  $L_1 - L_2$ , если на ординате не нанесены проценты, находим по формуле

$$\frac{L_1 - L_2 \cdot 100}{LO},$$

где  $LO$  — отрезок ординаты, соответствующий полному осаждению вещества  $Q$ .

Диаметр фракции вычисляется по формуле Стокса (2)

$$D = \sqrt{A \cdot V}; V = \frac{H}{t}, \text{ где}$$

$H$  — длина падения частиц, или глубина чашки весов от поверхности суспензии, что измерить можно для каждого срока наблюдения линейкой;

$t$  — время отсчета.

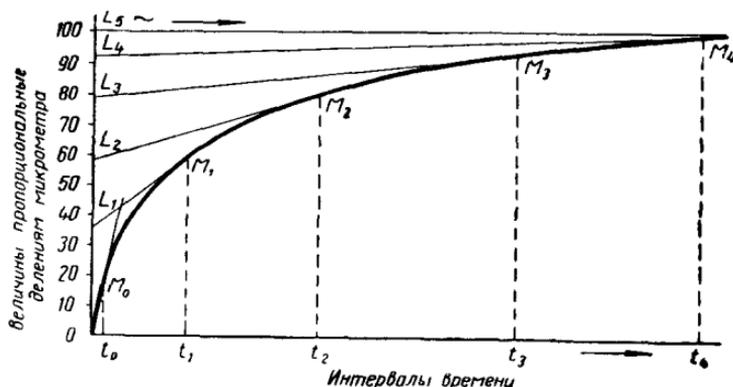


Рис. 10. Кривая осаждения полидисперсной системы

Для удобства отсчета на оси ординат с правой стороны откладывают значения  $Q$ , с левой — процентное содержание фракций.

В. Е. Корневская (1951) этот метод применила в следующей модификации: навеску почвы в 4 г, просеянную через сито в 1 мм, подготавливали к анализу по методу Качинского. Затем на приборе Сабанина отмучивали фракцию 0,25—0,05 (фракцию 1—0,25 определяли на сите), так как частицы  $> 0,05$  мм методом Фигуровского определялись грубо. Дальнейший анализ суспензии с частицами  $< 0,05$  мм производили на весах Фигуровского. Концентрацию суспензии предварительно определяли путем выпаривания 100 мл суспензии. Для анализа суспензию концентрации 0,30—0,35% помещали в цилиндр емкостью 0,5 л, диаметром = 8 см, взбалтывали мешалкой в течение 1 мин. Затем опускали чашку весов на глубину 7—8 см от поверхности суспензии и включали секундомер. Через 40—60 сек после прекращения колебания коромысла делали первый отсчет. Дальше отсчеты производились через промежутки времени, соответствующие

щие деформации коромысла на 1 деление. Наблюдения велись 24—26 час из расчета полного осаждения частиц  $> 0,001$  мм на чашку весов. По истечении этого времени над чашкой брали пипеткой пробу для определения частиц  $< 0,001$  мм, так как определение их на весах требует слишком много времени.

Сравнение данных, полученных на весах Фигуровского, с данными, полученными по методу пипетки, показывает, что при седиментометрическом анализе получается заниженное содержание крупной пыли, завышенное — средней и мелкой.

Седиментометрический метод необходимо в дальнейшем развивать и совершенствовать.

**Определение механического состава по средней пробе в стоячей воде.** Метод пипетки. Принцип метода основан на взятии пробы суспензии с определенной глубины, через известные промежутки времени. Впервые подобный метод определения был предложен в 1912 г. В. Г. Глушковым. Им был сконструирован прибор, который состоит из стеклянной трубки длиной 10—15 см и диаметром 10—15 мм. Дно трубки закрывается диском, укрепленным на стержне, проходящем через трубку. Сверху на стержень навинчивается гайка, нажатием на которую отодвигается нижний диск трубки и суспензия заполняет ее, затем трубку закрывают, пробу переносят в сушильный стаканчик, выпаривают, высушивают и определяют ее вес.

Через 10 лет (1922 г.) аналогичные методы независимо, по-видимому, от В. Г. Глушкова были опубликованы, почти одновременно, Робинзоном, Краусом, Томасом и Гарднером. Для взятия проб суспензии Робинзоном была предложена обычная пипетка объемом 20—25 мл; подготовка почвы Робинзоном осуществлялась по международному методу «А».

Метод пипетки был принят и рекомендован на международных конгрессах почвоведов в 1927 и 1930 гг. как стандартный для массовых определений механического состава почв, что содействовало его распространению.

Рядом исследователей этот метод разработан и уточнен (П. А. Земятченский, В. В. Охотин, Н. П. Карпинский, С. И. Долгов, Н. А. Качинский, Батурина и др.). Заслуживает внимания предложение Батурина заменить выпаривание и сушку проб определением плотности суспензии в специальной ампуле или в пикнометре.

В Советском Союзе широко применяется метод пипетки в варианте Н. А. Качинского.

Вариант метода пипетки по Н. А. Качинскому<sup>1</sup>. Для анализа из коробочного образца берут среднюю пробу воздушно-сухой почвы 100—150 г для подготовки к анализу. Небольшими порциями почву переносят в фарфоровую ступку, стирают пестиком с каучуковым наконечником, просеивают

<sup>1</sup> Дан в описании автора.

вают через сито с отверстиями в 1 мм и рассыпают тонким слоем на стекле или глянцевой бумаге, делят на 10 квадратных участков и роговой ложечкой или совочком равномерно из каждого квадрата берут почву для составления средних проб. Для анализа готовят 3 навески:

	Тяжело суглинистая и суглини- стая почва	Супеси и пески
1. Для определения гигроскопической воды . . . . .	4—5 г	10,0 г
2. Для определения потери от обработки HCl . . . . .	10—15 г	20—30,0 г
3. Для приготовления анализируемой суспензии . . . . .	10—15 г	20—30,0 г

Чем легче почва по механическому составу, тем большую навеску нужно брать.

Пробы для анализа отвешивают на часовом стекле, а затем переносят в фарфоровые чашки. Взвешивание производят на аналитических весах с точностью до 0,0001 г, если точность работы принята до 0,01%. При точности анализа до 0,1%, что вполне достаточно, взвешивание можно производить до 0,001 г.

Предварительно испытывают почву на карбонатность. На почву в чашке капают 10% HCl. Присутствие карбонатов отмечают по выделению пузырьков CO<sub>2</sub>. Далее карбонатные почвы обрабатывают 0,2 н. HCl до прекращения выделения пузырьков CO<sub>2</sub>.

В случае сильно карбонатных почв, в результате нейтрализации кислоты, последующие порции 0,2 н. HCl разжижаются и могут не показать вскипания даже при наличии карбонатов. В таком случае первые порции раствора из чашки нужно переносить на фильтр и снова действовать на оставшуюся в чашке основную массу почвы 0,2 н. HCl.

После разрушения карбонатов почва постепенно переносится 0,05 н. HCl на фильтр в воронке, причем пробы для определения потери от промывания помещают на заранее взвешенный фильтр. На фильтре почву промывают 0,05 н. HCl до исчезновения реакции на Ca<sup>++</sup>. Для этого собирают немного фильтрата в пробирку, нейтрализуют его аммиаком (10%), добавляя последний до появления запаха, подкисляют несколькими каплями уксусной кислоты (10%), добавляют щавелевокислого аммония (4% раствор — насыщенный) и нагревают пробирку до кипения. Наличие кальция будет отмечено по кристаллическому осадку CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> после охлаждения пробы. Затем почву промывают дистиллированной водой до исчезновения реакции на Cl (воздействуя на фильтрат AgNO<sub>3</sub> (5%) в подкисленной HNO<sub>3</sub> (10%) среде).

В случае появления мути в фильтрате (прохождение коллоидов через фильтр), промывание прекращают даже при наличии реакции на  $Cl'$ .

Почвы, не вскипающие от  $HCl$ , смачивают в чашке 0,05 н.  $HCl$ . Этим же раствором кислоты их переносят на фильтры и промывают на последних, как было описано выше, до исчезновения реакции на  $Ca^{++}$ , а потом на  $Cl'$ . По окончании промывания пробы почвы с невзвешенных фильтров поступают для анализа. Почву с фильтра смывают промывалкой в фарфоровую чашку слабой струей дистиллированной воды, сам же фильтр во второй чистой чашке очищают от приставших частиц почвы стеклянной палочкой и отжимают. Если из фильтра выжимается прозрачная вода, то это указывает на отсутствие в нем иловатых частиц почвы.

Из обеих фарфоровых чашек суспензию почвы переносят через воронку в коническую колбу, емкостью 750  $cm^3$ . В колбу доливают дистиллированную воду до 250  $cm^3$  и прибавляют раствор 1 н.  $NaOH$  исходя из емкости поглощения почвы — 1 мл на 10 м экв емкости поглощения. Средняя норма  $NaOH$  для типичных почв дана в табл. 6. Колбы с содержимым оставляют в спокойном состоянии на 2 час, при этом через 15 мин встряхи-

Таблица 6

Количество вводимой в суспензию 1 н.  $NaOH$   
для различных типов почв

Тип почвы	Количество 1 н. $NaOH$ в мл
Черноземы тучные . . . . .	6
Черноземы обыкновенные . . . . .	5
Черноземы южные (маломощные) . .	4,5
Каштановые почвы . . . . .	3,5
Бурые почвы . . . . .	3
Серые лесные земли . . . . .	3
Сероземы . . . . .	2
Подзолистые почвы тяжелые:	
горизонты $A_1$ и $A_2$ . . . . .	1
подгоризонты $B_1, B_2, B_3$ . . . . .	2
Подзолистые почвы легкие . . . . .	0,5
Солонцы и солонцеватые почвы в зависимости от их типа и зоны . . .	от 2 до 5
Красноземы, горизонт $A_1$ . . . . .	2
Остальные . . . . .	1,5

вают их вручную. После этого следует кипячение суспензии с обратным холодильником в течение часа. Кипячение не должно быть бурным. По охлаждении суспензии почву переносят в цилиндр через сито с отверстиями, диаметром 0,25 мм. Сито устанавливают на стеклянную воронку, а последнюю на литровый цилиндр (диаметр цилиндра 6—8 см). Сито струей дистиллированной воды тщательно промывают, причем почву слегка протирают рукой. Оставшиеся на сите частицы почвы 1—0,25 мм струей воды из промывалки смывают в чашку и, если нужно, разделяют с помощью сита с отверстиями 0,5 мм на две фракции: 1—0,5 мм и 0,5 — 0,25 мм. Фракции переносят в предварительно взвешенные стаканчики, воду из пробы выпаривают на песчаной или терра-фузеритовой бане до полного высыхания почвы, почву высушивают в термостате при 105° до постоянного веса.

Суспензию в цилиндре доливают дистиллированной водой до одного литра и анализируют, принимая во внимание скорости падения частиц в воде по Стоксу.

Практически удобными и оправдавшими себя можно считать следующие глубины погружения пипетки для выделения фракций различной крупности:

Для частиц: < 0,050 мм — 25 см;  
< 0,010 мм — 10 см;  
< 0,005 мм — 10 см;  
< 0,001 мм — 7 см.

Сроки взятия проб с различных глубин, считая с момента взмучивания суспензии, варьируют в зависимости от температуры и удельного веса твердой фазы почвы.

При анализах нужно стремиться, по возможности, к стандартной температуре. Если есть возможность, цилиндры с суспензией при длительном отстаивании нужно помещать в термосы-чехлы или гнезда со стенками и крышкой из непроводников тепла, способствующих сохранению постоянной температуры воды в цилиндре при отстоях. В противном случае анализ нужно проводить в помещении с наименьшими колебаниями температуры. Цилиндры с суспензией в этом (последнем) случае при отстаивании следует накрывать картонными цилиндрическими колпаками, которые будут ослаблять колебания температуры суспензии и броуновское движение мелких частиц, а также предохранять суспензию от запыления.

Для измерения температуры во время анализа термометр помещают в такой же цилиндр с водой, в каком отстаивается суспензия, причем этот цилиндр также защищают от колебания температуры, как и прочие. Поскольку интервал времени между взбалтыванием суспензии и взятием пробы для определения содержания частиц < 0,05, < 0,01 и < 0,005 мм невелик, температуру можно измерить один раз. При учете частиц < 0,001 мм

температуру следует измерить трижды: после взбалтывания суспензии, в середине интервала отстаивания суспензии и перед пипетированием. Из трех отсчетов вычисляют среднюю температуру воды, которую и принимают во внимание при выборе скоростей падения механических элементов почвы в воде.

Что касается удельного веса твердой фазы почвы, то рекомендуется брать точную величину удельного веса данной почвы, тем более, что удельный вес твердой фазы стал почти обычным анализом при характеристике физических свойств почвы. Для облегчения работы можно воспользоваться некоторыми рекомендациями на тот случай, когда не будет конкретных величин удельного веса анализируемой почвы или близкого к ней почвенного типа:

1. Считаем возможным ограничить дифференциацию удельного веса твердой фазы почвы для целей механического анализа применительно к следующим глубинам: 0—20 см (пахотный слой); 20—40 см; 40—100 см; глубже 100 см.

2. Можно использовать средние данные по удельному весу твердой фазы различных зональных почв для вышеозначенных глубин (табл. 7). Величины рекомендуем как приблизительные, на основании массовых анализов, имеющих в нашем распоряжении, сознательно округляя их до 0,05.

Таблица 7

Удельный вес твердой фазы различных почв

Глубина в см	Легкие почвы всех типов	Суглинистые и глинистые						Солонцы
		подзолистые и серые лесные земли	черноземы обыкновенные и тучные	черноземы южные	каштановые почвы	бурые почвы и сероземы	красноземы первичные, несмытые	
0—20	2,60	—	—	—	—	—	—	Величины брать по типу той почвы, в зоне которой они залегают
—	2,65	2,60	2,40	2,55	2,60	2,65	2,60	
20—40	2,65	2,65	2,50	2,60	2,65	2,70	2,65	
40—100	2,65	2,70	2,65	2,65	2,70	2,70	2,75	
100	2,65	2,70	2,70	2,70	2,75	2,75	2,80	

Для почв целинных нужно особо выделять удельный вес слоя 0,5 см, который сильно варьирует, в зависимости от гумосности почвы и развития дернины, но чаще держится около величины 2,2—2,5.

Ниже приводим таблицу сроков взятия проб суспензии при анализе с различных глубин, в соответствии со скоростями падения почвенных частиц в воде по Стоксу при различных температурах и различных удельных весах твердой фазы почвы (табл 8).

Расчет скоростей падения ведем по формуле Стокса:

$$V = \frac{2}{9} gr^2 \cdot \frac{d_1 - d}{\eta}, \text{ где}$$

- $r$  — радиус падающей частицы,
- $d_1$  — удельный вес падающей частицы,
- $d$  — удельный вес жидкости, в которой ведется анализ,
- $g$  — ускорение силы тяжести при свободном падении тела, равное 981 см/сек,
- $\eta$  — вязкость жидкости.

Установка для взятия пробы суспензии представлена на рис. 11 (общий вид). Она состоит из следующих частей: шта-

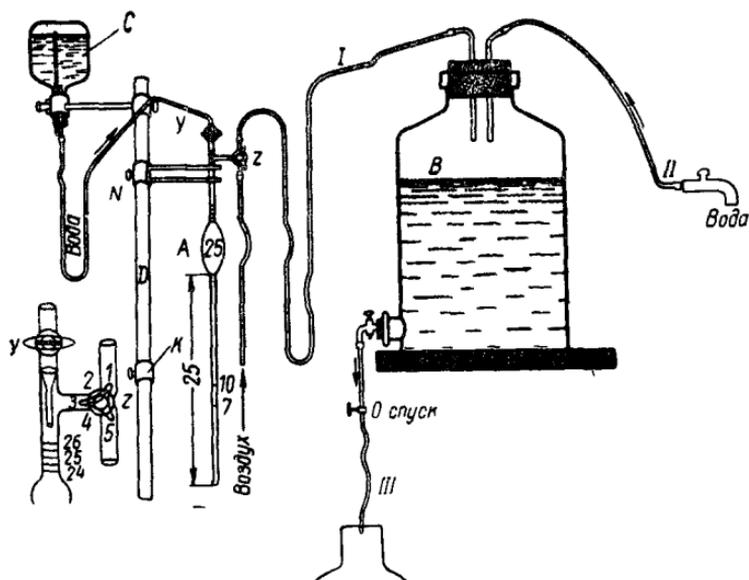


Рис. 11. Схема установки для определения механического состава почвы методом пипетки:

$D$  — штатив,  $A$  — пипетка,  $B$  — аспиратор для засасывания суспензии,  $C$  — колба с дистиллированной водой для промывания пипетки,  $K$  — шайба для регулировки погружения пипетки в суспензию на заданную глубину,  $Y$  — одноходовой кран, позволяющий регулировать подачу воды из промывной колбы в пипетку,  $Z$  — двухходовой кран, позволяющий осуществлять засасывание анализируемой суспензии почвы и спуск ее в сушильный стаканчик,  $N$  — держатель пипетки

тив ( $D$ ); пипетка ( $A$ ): колба с дистиллированной водой для промывания пипетки ( $C$ ) и аспиратор ( $B$ ) для засасывания суспензии. Колба ( $C$ ) и пипетка ( $A$ ) закрепляются на штативе с по-

Интервалы времени взятия проб при механическом анализе в зави

Диаметр частиц в мм меньше	Удель- ный вес частиц	Глубина взятия проб в см	Темпе		
			12,5°	15°	17,5°
0,05	2,40	25	159"	149"	140"
0,01	—	10	26'31"	24'51"	23'20"
0,005	—	10	1 ч. 46'05"	1 ч. 39'27"	1 ч. 33'19"
0,001	—	7	30 ч. 56'16"	29 ч. 00'00"	27 ч. 12'51"
0,05	2,45	25	154"	144"	135"
0,01	—	10	25'36"	24'00"	22'31"
0,005	—	10	1 ч. 42'23"	1 ч. 36'00"	1 ч. 30'05"
0,001	—	7	29 ч. 52'23"	28 ч. 00'06"	26 ч. 16'35"
0,05	2,50	25	148"	139"	131"
0,01	—	10	24'45"	23'12"	21'46"
0,005	—	10	1 ч. 38'58"	1 ч. 32'48"	1 ч. 27'05"
0,001	—	7	28 ч. 55'30"	27 ч. 03'59"	25 ч. 26'04"
0,05	2,55	25	144"	135"	127"
0,01	—	10	23'57"	22'27"	21'04"
0,005	—	10	1 ч. 35'47"	1 ч. 29'48"	1 ч. 24'16"
0,001	—	7	27 ч. 56'44"	26 ч. 11'41"	24 ч. 36'36"
0,05	2,60	25	139"	130"	122"
0,01	—	10	23'12"	21'45"	20'25"
0,005	—	10	1 ч. 32'48"	1 ч. 26'59"	1 ч. 21'37"
0,001	—	7	27 ч. 04'12"	25 ч. 22'28"	23 ч. 48'41"
0,05	2,65	25	135"	127"	119"
0,01	—	10	22'30"	21'06"	19'48"
0,005	—	10	1 ч. 30'00"	1 ч. 24'21"	1 ч. 19'08"
0,001	—	7	26 ч. 15'05"	24 ч. 36'25"	23 ч. 05'26"
0,05	2,70	25	131"	123"	115"
0,01	—	10	21'50"	20'28"	19'13"
0,005	—	10	1 ч. 27'21"	1 ч. 21'54"	1 ч. 16'50"
0,001	—	7	25 ч. 28'51"	23 ч. 53'05"	22 ч. 24'42"
0,05	2,75	25	127"	119"	112"
0,01	—	10	21'13"	19'53"	18'40"
0,005	—	10	1 ч. 24'52"	1 ч. 19'33"	1 ч. 14'38"
0,001	—	7	24 ч. 45'04"	23 ч. 12'02"	21 ч. 46'19"
0,05	2,80	25	124"	116"	109"
0,01	—	10	20'39"	19'20"	18'09"
0,005	—	10	2 ч. 22'30"	1 ч. 17'20"	1 ч. 12'34"
0,001	—	7	24 ч. 03'54"	22 ч. 33'26"	21 ч. 07'03"

## симости от температуры и удельного веса твердой фазы почвы

ратура

20°	22,5°	25°	27,5°	30°
132"	124"	117"	111"	105"
21'59"	20'41"	19'33"	18'27"	17'28"
1 ч. 27'54"	1 ч. 2'45"	1 ч. 18'13"	1 ч. 18'49"	1 ч. 09'55"
25 ч. 28'20"	24 ч. 23"	22 ч. 48'31"	21 ч. 31'48"	20 ч. 23'11"
127"	120"	113"	107"	101"
21'13"	19'59"	18'53"	17'49"	16'52"
1 ч. 24'53"	1 ч. 19'54"	1 ч. 15'31"	1 ч. 11'15"	1 ч. 07'29"
24 ч. 45'15"	23 ч. 18'23"	22 ч. 01'15"	20 ч. 47'14"	19 ч. 41'05"
123"	116"	109"	103"	98"
20'31"	19'19"	18'15"	17'13"	16'19"
1 ч. 22'01"	1 ч. 17'14"	1 ч. 12'58"	1 ч. 08'52"	1 ч. 05'14"
23 ч. 55'43"	22 ч. 31'52"	21 ч. 17'17"	20 ч. 05'36"	19 ч. 01'40"
119"	111"	106"	100"	95"
19'51"	18'41"	17'39"	16'40"	15'47"
1 ч. 19'24"	1 ч. 14'44"	1 ч. 10'37"	1 ч. 06'40"	1 ч. 03'08"
23 ч. 09'23"	21 ч. 48'13"	20 ч. 36'00"	19 ч. 26'47"	18 ч. 24'54"
115"	109"	103"	97"	92"
19'14"	18'14"	17'06"	16'09"	15'17"
1 ч. 16'55"	1 ч. 12'24"	1 ч. 08'25"	1 ч. 04'34"	1 ч. 01'10"
22 ч. 25'57"	21 ч. 07'17"	19 ч. 57'26"	18 ч. 50'16"	17 ч. 50'20"
112"	105"	100"	94"	89"
18'39"	17'33"	16'35"	15'39"	14'50"
1 ч. 14'34"	1 ч. 10'12"	1 ч. 06'21"	1 ч. 02'38"	59'19"
21 ч. 45'09"	20 ч. 28'59"	19 ч. 21'13"	18 ч. 16'05"	17 ч. 17'52"
109"	102"	97"	91"	86"
18'06"	17'02"	16'06"	15'12"	14'23"
1 ч. 12'24"	1 ч. 08'10"	1 ч. 04'24"	1 ч. 00'47"	57'34"
21 ч. 06'44"	19 ч. 52'47"	18 ч. 48'40"	17 ч. 43'48"	16 ч. 47'24"
105"	99"	94"	89"	84"
17'35"	16'33"	15'38"	14'46"	13'59"
1 ч. 10'19"	1 ч. 06'13"	1 ч. 02'34"	59'04"	55'56"
20 ч. 30'32"	19 ч. 18'40"	18 ч. 14'51"	17 ч. 13'27"	16 ч. 18'35"
103"	97"	91"	86"	82"
17'06"	16'06"	15'12"	14'21"	13'35"
1 ч. 08'22"	1 ч. 04'23"	1 ч. 30'50"	57'25"	54'22"
19 ч. 56'28"	18 ч. 40'34"	17 ч. 44'23"	16 ч. 44'42"	15 ч. 51'22"

мощью шайб с винтами. На штативе имеется еще 3-я шайба (*K*) Она служит для регулировки погружения пипетки в суспензию на заданную глубину.

Пипетка, длиною 26 см, имеет овальную форму, что дает возможность лучше промывать ее водой. Верхняя часть пипетки снабжена жестким развилком в виде двух параллельных трубок. На рис. 11 (слева) эта часть пипетки дана в увеличенном виде. В конце пипетки, соединенной с колбой для воды, впаяна капиллярная трубочка, снабженная в нижней части отверстиями по окружности. Благодаря этому приспособлению, вода «веером» разбрызгивается на стенки трубки пипетки и оmyвает ее. После закрытия крана (*У*) этот же капилляр препятствует стеканию в пипетку капель воды из каучуковой трубки, ведущей к колбе.

На трубке пипетки тонкими резиновыми кольцами отмечаются границы для погружения пипетки на глубину 7,10 и 25 см.

Известно, что взятие пипеткой строго определенного ( $25 \text{ см}^3$ ) объема суспензии представляет значительные затруднения. Для устранения этой трудности в анализе отмечаем на пипетке объемы:  $24 \text{ см}^3$ ,  $24,5 \text{ см}^3$ ,  $25,5 \text{ см}^3$ ,  $26 \text{ см}^3$ , что позволяет, не изменяя взятого при анализе объема суспензии, при закрывании крана рассчитать результаты анализа, исходя из фактически взятого объема, приводя их к литру, а следовательно, к исходной навеске.

В пипетке имеется два крана: один одноходовой кран (*У*), позволяющий регулировать подачу воды из колбы в пипетку, и второй — двухходовой кран (*Z*), позволяющий осуществлять засасывание анализируемой суспензии почвы и спуск ее в стаканчик.

Взятие пробы суспензии осуществляется следующим образом. Штатив придвигают к цилиндру. Передвигая шайбу с пипеткой по стержню штатива, находят положение держателя (*N*), при котором пипетка может быть погружена в цилиндр на заданную глубину. После этого под держатель (*N*) подводят шайбу (*K*) и закрепляют последнюю наглухо. Суспензию в цилиндре взбалтывают с помощью мешалки<sup>1</sup> быстро повторяющимися (вверх и вниз) движениями — 60 ударов в одну сторону в течение одной минуты.

По истечении срока (см. табл. 8), необходимого для взятия частиц заданной крупности, с помощью аспиратора в пипетку берут пробу суспензии. Для этого необходимо пипетку по штативу поднять вверх, ввести ее внутрь цилиндра, стремясь попасть в центр его поперечного сечения, и снова (осторожно) опустить до соприкосновения держателя (*N*) с шайбой (*K*). Затем открывают кран (*Z*), ориентируя изогнутое отверстие в нем в направлении 1—3 (см. левую часть рисунка).

<sup>1</sup> Мешалка — резиновый круг с отверстиями, закрепленный на конце стеклянной палочки. Длина палочки — 60 см, диаметр палочки — 8 мм; диаметр резинового круга — 5 см; диаметр отверстия круга — 3 мм

Пробу в пипетку засасывают медленно: 25 мл суспензии при определении фракций  $< 0,005$  мм — 30 сек; фракций  $< 0,01$  мм — 25 сек и фракций  $< 0,05$  мм — 20 сек.

Так как время взятия фракции  $< 0,05$  мм может значительно сказаться на точности ее учета, следует время забора этой фракции начать ранее на пол-интервала засасывания и кончать его на пол-интервала позже положенного срока. Например, при температуре  $15^{\circ}\text{C}$  следует начать забор фракции через 113 сек после взбалтывания дисперсии и закончить его через 133 сек.

Аспиратор для засасывания суспензии (см. рис. 11) соединен тремя каучуковыми трубками с пипеткой, краном, подающим воду, и водосливом. До анализа бутылка аспиратора наполняют водой и плотно закрывают пробкой. Перед взятием проб и во время взятия проб зажим на сливной трубке слегка приоткрывают и создают слабый постоянный отток воды из аспиратора. По окончании взятия проб сливную трубку закрывают зажимом.

Взяв пробу (до черты выше резервуара пипетки), поворотом влево крана (Z) выключают аспиратор (отверстие в кране должно быть ориентировано в направлении 2—4), вынимают пипетку из цилиндра и сливают суспензию в протарированный сушильный стаканчик или тигель, для чего кран (Z) снова поворачивают влево (направление отверстия в кране 3—5). В пипетку поступает воздух. Открыв кран (У), обмывают пипетку дистиллированной водой, которую собирают в тот же сушильный стаканчик или тигель. Пробу выпаривают на бане с песком или террофузитом и сушат в течение 4 час при  $105^{\circ}\text{C}$  до постоянного веса в термостате. Зная вес тары, находим вес учитываемой фракции.

Почву с взвешенными фильтрами, взятую для определения потери от обработки  $\text{HCl}$ , после отмыва карбонатов 0,05 н.  $\text{HCl}$  и последующей отмывки хлора переносят в заранее взвешенные сушильные стаканчики, высушивают при  $105^{\circ}\text{C}$ , взвешивают и определяют потерю от промывания почвы соляной кислотой и водой.

Вычисление содержания фракций в % % ведется по формуле

$$x = \frac{a \cdot 1000 \cdot 100}{v \cdot m} \%, \text{ где} \quad (8)$$

$x$  — искомая фракция в % % меньше какого-то нужного нам размера (например  $\angle 0,05$  мм;  $\angle 0,01$  мм и т. д.);

$a$  — вес фракции меньше искомого размера (в г), найденный при анализе;

$v$  — объем пипетки в мл;

$m$  — вес абсолютно сухой навески, взятой для анализа.

Вес фракций определенного размера (0,05 — 0,01 мм; 0,01 — 0,05 мм; 0,005 — 0,001 мм и  $< 0,001$  мм) находят путем вычитания из веса или процентного содержания предыдущей фракции веса или процентного содержания последующей.

Пример вычисления:

- 1) Абсолютно сухая навеска почвы: 9,4106 г;
- 2) Вес фракции размером 1—0,25 мм — 0,0226 г;
- 3) Потеря при обработке почвы HCl — 0,2832 г;
- 4) Вес фракций в 25 см<sup>3</sup> суспензии (а):

Размер фракций (в мм)	Вес фракций (в г)
< 0,05	0,2121
< 0,01	0,1461
< 0,005	0,1210
< 0,001	0,0770

- 5) Фракции в %% от веса сухой почвы:

Размер фракций (в мм)	Фракции (в %%)
1—0,25	$\frac{0,0226 \cdot 100}{9,4106} = 0,24$
< 0,05	$\frac{0,2121 \cdot 1000}{9,4106 \cdot 25} = 90,15$
< 0,01	$\frac{0,1461 \cdot 1000 \cdot 100}{9,4106 \cdot 25} = 62,10$
< 0,005	$\frac{0,1210 \cdot 1000 \cdot 100}{9,4106 \cdot 25} = 51,48$
< 0,001	$\frac{0,0770 \cdot 1000 \cdot 100}{9,4106 \cdot 25} = 32,73$

В суспензию внесено 4 мл NaOH, что составляет 1,6%

$$32,73 - 1,6 = 31,13$$

- 6) Вес фракций в %% от веса сухой почвы:

Размеры фракций (в мм)	Фракции (в %%)
1—0,25	0,24
0,05—0,01	28,05 = 90,15 — 62,10
0,01—0,005	10,67 = 62,10 — 51,48
0,005—0,001	18,35 = 51,48 — 32,13
< 0,001	32,73 = 32,73 — 1,6 = 31,13

- 7) Потеря от обработки почвы HCl:  $\frac{0,2832 \cdot 100}{9,4106} = 3,101\%$

- 8) Фракции размером 0,25—0,05 мм в %% от веса сухой почвы составляют:

$$100 - (0,24 + 28,05 + 10,67 + 18,70 + 31,13 + 3,01) = 8,20\%$$

Тот же расчет можно произвести и иначе: вначале вычислить вес фракций (0,05—0,01 мм и др.) в г, а затем в % к сухой навеске.

В почвах карбонатных «потерю» следует выделить особой графой «сборная фракция», включая ее в 100% механического состава почвы.

В почвах, не насыщенных основаниями, потеря от обработки, обычно не превышающая нескольких %, состоит в основном из несиликатных форм железа и алюминия. В этом случае ее целесообразно прибавить к илистой фракции.

Принято проводить анализ с использованием литровых мерных цилиндров. В наших лабораториях изучено влияние габаритов цилиндров на результаты анализа (Кочерина, В. Е. Корневская). Показана полная допустимость использования для механического анализа пипеточным методом мерных цилиндров емкостью в 500 мм, при диаметре их не менее 4 см. Использование таких цилиндров влечет за собой: а) уменьшение анализируемой навески и реактивов для обработки ее, а отчасти и требуемого для этого времени; б) уменьшение количества дистиллированной воды для анализа; в) возможность применения для анализа масово изготовляемых дюаровских сосудов емкостью в 500 мл, хорошо сохраняющих заданную температуру. Недостатком цилиндров емкостью 500 мл является более резкое снижение в них уровня жидкости при отборе проб, о чем следует помнить в случае необходимости повторных проб.

Метод пипетки в варианте кафедры почвоведения Тимирязевской сельскохозяйственной академии. Навеску почвы обрабатывают соляной кислотой, как и в варианте метода Качинского, переносят в колбу с дистиллированной водой в объеме 300 мл для кипячения, добавляют 1-процентный раствор  $\text{NH}_4\text{OH}$  до устойчивого запаха и слабощелочной реакции и оставляют стоять в течение 2—2,5 час, затем в течение 3 час кипятят. Дальнейший ход анализа такой же, как в методе Качинского. Потерю от обработки почвы соляной кислотой устанавливают путем определения плотного остатка в фильтрате, объем которого строго учитывают.

Применение слабого диспергатора, по-видимому, привело к необходимости увеличить срок кипячения до 3 час. Это обстоятельство и определение потери от обработки почвы соляной кислотой по плотному остатку фильтрата требует большого напряжения и времени, следовательно, не улучшает метода.

С точки зрения необходимости максимальной дезагрегации почвы при подготовке ее к механическому анализу этот метод для всеобщего использования непригоден. Он применим при специальных исследованиях, когда не требуется максимальной дезагрегации почвы и когда можно обойтись сравнительно слабым диспергатором  $\text{NH}_4\text{OH}$ .

## СПОСОБЫ ВЫРАЖЕНИЯ ДАННЫХ МЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Полученные данные механического анализа обычно дают в виде табл. 9, в которой наряду с фракциями приводят гигроскопическую влажность и потери от обработки почвы HCl.

Таблица 9

Данные механического анализа методом пипетки  
(в % веса сухой почвы)

№№ разреза	Почва, угодье и пункт	Горизонт	Глубина взятия образца в см	Гигроскопич. влажность в %	Потери от обработки 0,05 н. HCl	Фракции в мм								
						1—0,25	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	√ 0,001	сумма частиц		
												√ 0,01	∧ 0,01	
5	Солонец корково-столбчатый	A	0—5	1,18	1,63									
		B <sub>1</sub>	8—18	4,60	2,13	0,10	7,70	31,42	5,45	10,05	43,15	58,65	41,35	
	тяжелосуглинистый	B <sub>2</sub>	20—30	3,33	10,14	—	7,50	37,25	2,48	9,52	33,11	45,11	54,89	
	иловато-крупнопылеватый	C <sub>1</sub>	50—60	3,02	19,35	—	11,34	30,53	4,33	7,63	26,82	38,78	61,22	

По гигроскопической влажности можно приблизительно контролировать данные гранулометрического анализа; что касается потери от обработки почв HCl, то она имеет самостоятельное значение. Величина ее характеризует наличие в почве легко растворимых солей и карбонатов.

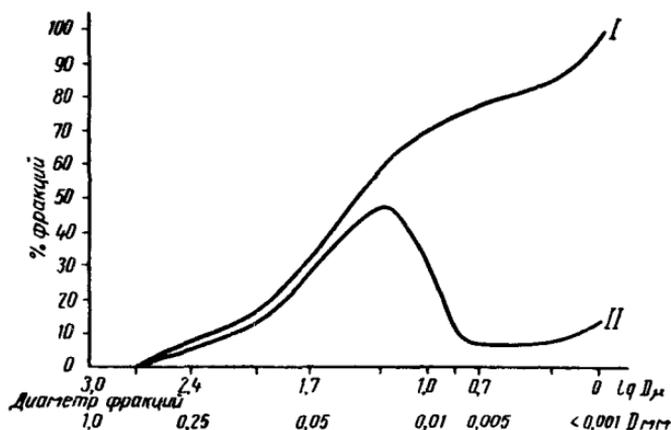


Рис. 12. Кривые распределения фракций различного размера (почва солонец, горизонт A<sub>1</sub>)  
I — интегральная кривая, II — дифференциальная кривая

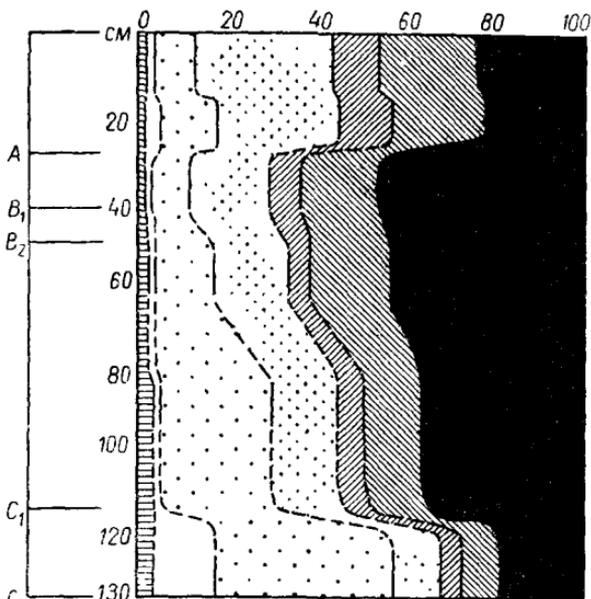
Цифровой материал оформляют графически.

1) *Интегральная кривая* (рис. 12, I). По оси абсцисс откладывают размеры частиц или логарифмы диаметра этих частиц, по оси ординат вначале откладывают процентное содержание самой крупной фракции, затем сумму из процентного содержания каждой последующей и предыдущей фракций. Последнее слагаемое фракций составит 100%. На одном графике можно разместить 3—4 кривых распределения механических элементов.

2) *Дифференциальная кривая* (рис. 12, II). По оси абсцисс откладывают размеры или логарифмы диаметра этих частиц; по оси ординат — процентное содержание фракций.

3) *Циклограмма*; процентное содержание фракций различного размера вписывают в круг. При этом длину окружности принимают за 100%. Следовательно, длина дуги, отвечающая углу  $3,6^\circ$ , соответствует 1% фракции данного размера.

4) *Профильная диаграмма*; ее составляют при наличии данных анализа почвы или грунта по глубинам (рис. 13). По оси ординат откладывают глубины, по оси абсцисс — процентное содержание фракций. При этом каждую последующую фракцию откладывают от предыдущей. Такой способ изображения дает наглядное представление о гранулометрическом составе почвы на всю изучаемую глубину. Он широко используется в аналитической почвенной практике.



Условные обозначения:

	Потеря при обработке		Пыль средняя
	Песок средний		Пыль мелкая
	Песок мелкий		Ил
	Пыль крупная		

Рис. 13. Профильная диаграмма

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ МЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

По данным механического анализа определяют группу почвы по механическому составу. Существует ряд классификаций почвы по механическому составу, которые необходимо применять с учетом метода анализа.

Классификация Сибирцева до 1940 г. была наиболее распространенной; в основу ее положено соотношение между фракциями физической глины и физического песка. Эту классификацию используют при гранулометрическом анализе по Шене.

Таблица 10  
Классификация почвы по механическому составу  
(Сибирцева)

Название почвы	Соотношение физической глины и песка	Содержание физической глины в %
Глинистые . . . . .	от 1:1 до 1:2	>33
Тяжелосуглинистые . .	1:1 —1:3	25—33
Среднесуглинистые . .	1:3 —1:4	20—25
Легкосуглинистые . . .	1:4 —1:6	14—20
Супесчано-суглинистые	1:6 —1:10	9—14
Песчаные почвы . . . .	1:10—1:15	6—9
Глинистые пески . . . .	1:15—1:50	3—6

Классификация Качинского. При практическом использовании классификации название почвы по гранулометрическому составу определяется на основании количественного содержания физического песка и глины (табл. 11) и по преобладающим фракциям: гравелистой—1—3 мм, песчаной 1—0,05 мм, крупнопылевой 0,01—0,05 мм, пылевой 0,01—0,001 мм и иловатой <0,001 мм.

Классификация разработана пока для трех типов почвообразования: подзолистого, степного вместе с почвами красноземного типа и солонцового.

Если анализируемый солонец содержит физической глины 50%, ила 40%, пыли —20%, крупной пыли 25% и 15% приходится на остальные фракции, то по табл. 11, на основании содержания физической глины, определяют группу механического состава, в данном случае — глина легкая. Из преобладающих фракций выделяется на первое место ил и затем пыль крупная. Полное название солонца будет — солонец легкоглинистый, крупнопылево-иловатый.

При анализе чернозема установлено: содержание физической глины — 80%, ила 45%, пыли 25%, пыли крупной 20% и песка 10%. Преобладающая фракция — ил, на втором месте — пыль. Полное название почвы — чернозем среднеглинистый пылево-иловатый и т. д.

**Классификация почв  
по механическому составу Н. А. Качинского**

Содержание физической глины (частиц < 0,01 мм) в %			Содержание физического песка (частиц > 0,01 мм) в %			Краткое название почвы по механическому составу
почва			почва			
подзолистого типа почвообразования	степного типа почвообразования, красноземы и желтоземы	солонцы и силь- но солонцеватые почвы	подзолистого типа почвообразования	степного типа почвообразования, красноземы и желтоземы	солонцы и силь- но солонцеватые почвы	
0—5	0—5	0—5	100—95	100—95	100—95	Песок рыхлый — <i>П<sub>р</sub></i>
5—10	5—10	5—10	95—90	95—90	95—90	Песок связан- ный — <i>П<sub>св</sub></i>
10—20	10—20	10—15	90—80	90—80	90—85	Супесь — <i>С</i>
20—30	20—30	15—20	80—70	80—70	85—80	Суглинок лег- кий — <i>С<sub>л</sub></i>
30—40	30—45	20—30	70—60	70—55	80—70	Суглинок сред- ний — <i>С<sub>ср</sub></i>
40—50	45—60	30—40	60—50	55—40	70—60	Суглинок тяже- лый — <i>С<sub>т</sub></i>
50—65	60—75	40—50	50—35	40—25	60—50	Глина легкая — <i>Г<sub>л</sub></i>
65—80	75—85	50—65	35—20	25—15	50—35	Глина средняя — <i>Г<sub>ср</sub></i>
>80	>85	>65	<20	<15	<35	Глина тяжелая — <i>Г<sub>т</sub></i>

Примечание: в результатах анализа для почв, не насыщенных основаниями, потеря при обработке почвы 0,05 н. HCl приплюсовывается к «физической» глине; для почв, насыщенных основаниями, она приплюсовывается к «физическому» песку.

Если в почве есть гравий (1—3 мм), он включается в 100, причисляясь к песку. Вторая цифра в подразделениях таблицы всюду дана «включительно». Название почвы по механическому составу дается по данным анализа для пахотного слоя (0—30 см).

При определении почвы по гранулометрическому составу удобно пользоваться диаграммой, предложенной Н. А. Качинским (рис. 14); на ней по оси ординат даны проценты физической глины, по оси абсцисс — группы почв по механическому составу. Три кривые соответствуют основным типам почвообразования. Зная содержание физической глины, легко определить по графику группу почвы по механическому составу.

При крупномасштабных почвенных съемках — 1 : 25 000

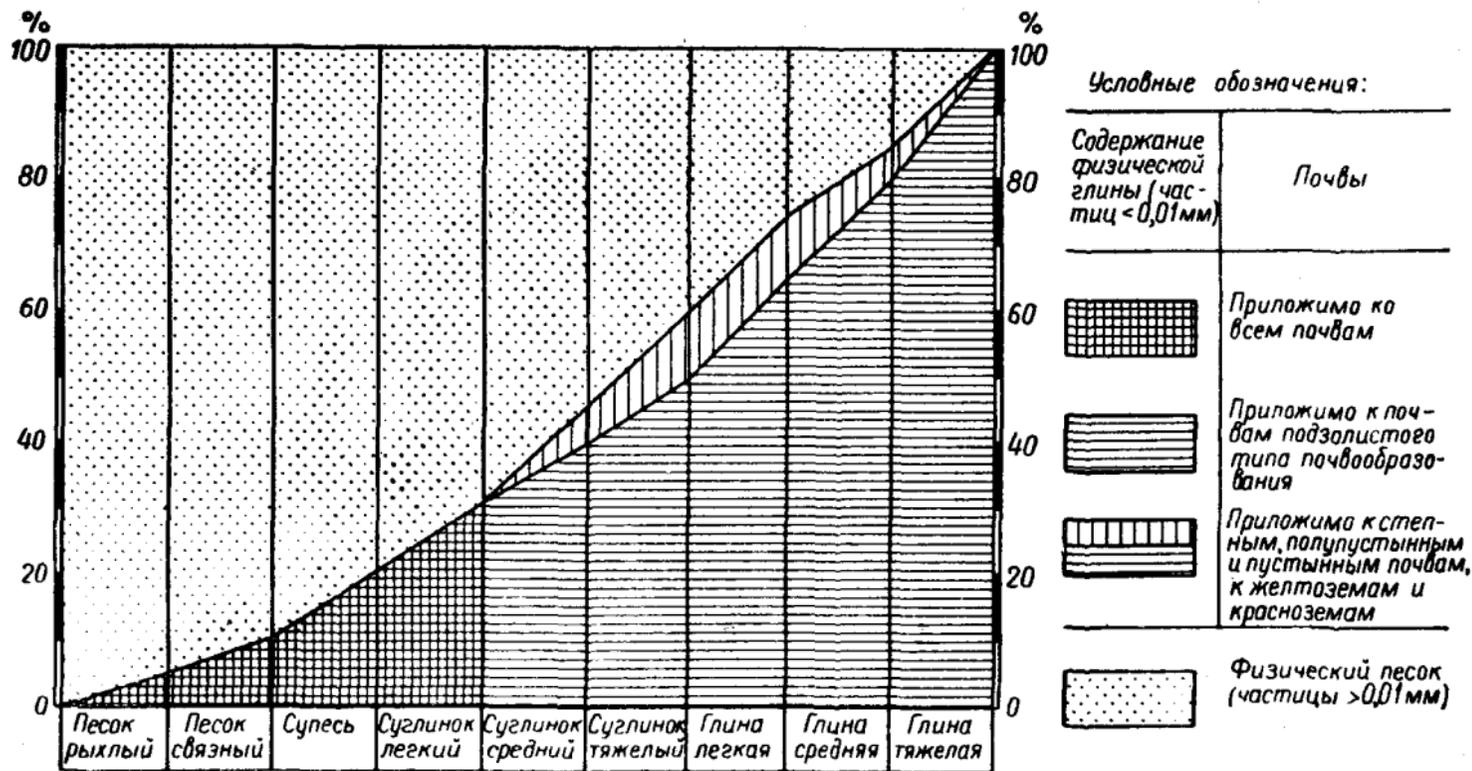


Рис. 14. Механический состав почв в % от их сухого веса (по Качинскому)

и более применяются обе шкалы классификации и дается полное название почвы.

Каменные почвы классифицируются по мелкозему так же, как и некаменные, и, кроме того, дается классификация почв по каменности (табл. 12).

Таблица 12  
Классификация почв по каменности

%, частиц 3 мм	Название почвы по каменности	Тип каменности
< 0,5	Почва некаменная	Устанавливается по характеру скелетной части—почвы валунные, галечниковые, щебенчатые
0,5—5	Слабокаменная	
5—10	Среднекаменная	
> 10	Сильнокаменная	

Таблица 13

Классификация грунтов по механическому составу  
В. В. Охотина

Название грунтов	Содержание частиц в %		
	0,005 мм глина	0,005—0,25 мм пыль	0,25—2,0 мм песок
Тяжелая глина . . .	>60	—	—
Глина . . . . .	60—30	—	—
Пылеватая глина . .	30	Больше, чем каждый из двух других фракций грунта	—
Тяжелый суглинок .	30—20	—	Больше, чем пылеватых
Пылеватый средний суглинок . . . . .	30—20	Больше, чем песчн.	—
Средний суглинок .	20—15	—	Больше, чем пылеватых
Пылеватый средний суглинок . . . . .	20—15	Больше, чем песчн.	—
Легкий суглинок . .	15—10	—	Больше, чем пылеватых
Пылеватый легкий суглинок . . . . .	15—10	Больше, чем песчн.	—
Супесь тяжелая . .	10—6	—	Больше, чем пылеватых
Пылеватая тяжелая супесь . . . . .	10—6	Больше, чем песчн.	—
Легкая супесь . . .	6—3	—	Больше, чем пылеватых
Пылеватая легкая супесь . . . . .	6—3	Больше, чем песчн.	—
Песок . . . . .	< 3	—	Больше, чем пылеватых
Пылеватый песок . .	< 3	Больше, чем песчн.	—

В грунтоведении широко используется трехчленная классификация В. В. Охотина. При этом учитываются частицы  $< 0,005$ ;  $0,005 - 0,25$  и  $0,25 - 2,0$  мм — глина, пыль и песок по номенклатуре В. В. Охотина (табл. 13).

### ИЗОБРАЖЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ПОЧВЕННЫХ КАРТАХ

На картах мелкомасштабных чаще пользуются сокращенной шкалой или классификации объединяют в более крупные группы. Например, на почвенной карте СССР выделены глинистые и тяжелосуглинистые почвы, с подразделением на иловатые и пылеватые разновидности, средне- и легкосуглинистые почвы — песчаные и пылеватые. Механический состав на почвенной карте должен быть отображен цветом почв: песчаные и супесчаные почвы закрашиваются светло-желтым цветом, легкие суглинки — палевым, тяжелые — коричневым, глины — красным цветом. Цветовым изображением пользуются и при нанесении на карту генетических почвенных типов и разновидностей, поэтому, если нельзя совместить эти два признака, то механический состав целесообразно изображать штриховкой. На рис. 15 дана штриховка для изображения на карте механического состава почв и почвообразующих пород, использованная Почвенным институтом при составлении почвенной карты СССР. Можно использовать индексы (табл. 11), которые ставятся внутри контура рядом с его номером.

### ВЫЧИСЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО МЕХАНИЧЕСКОМУ СОСТАВУ

Гранулометрический показатель структуры почв вычисляется для гумусных почв по формуле 15 (см. стр. 70) и безгумусных по формуле 16 (см. стр. 70).

Расчет коэффициента фильтрации По Газену коэффициент фильтрации  $K$  определяется по формуле

$$K \text{ см/сек} = B (0,7 + 0,03 t^\circ) \cdot d_{эф}, \text{ где} \quad (9)$$

$t^\circ$  — температура,

$d_{эф}$  — эффективный диаметр,

$B$  — коэффициент в пределах 116—150.

Козени предложил иную формулу для вычисления:

$$K \text{ см/сек} = 624 \frac{\rho^3}{(1-\rho)^3} d_{эф}^2, \text{ где} \quad (10)$$

$\rho$  — коэффициент пористости, при общей порозности почвы 60%, коэф. пористости равен 0,60,

$d_{эф}$  — действующий диаметр в см.

Почвы на рыхлых отложениях

Почвы на плотных осадочных и кристаллических породах (большой частью щебнистые)



Рис. 15. Условные обозначения механического состава почв на картах

Расчет производится по данным механического и микроагрегатного состава по Газену и Козени. Результаты сравниваются и оцениваются.

Вычисление эффективного или действующего диаметра частиц —  $d_{эф}$ . Для некоторых расчетов, например, для определения коэффициента фильтрации по данным гранулометрического состава необходимо бывает определить «действующий» диаметр данной полидисперсной системы. «Действующим» диаметром называют такой диаметр частиц, при котором однородная масса, сложенная из частиц такого размера, обладает той же величиной коэффициента фильтрации, как и исследуемая система.

Газен предложил считать действующим диаметром диаметр таких частиц, которые составляют 10% всей массы почвы —  $d_{10}$ . Определяется он по интегральной кривой: на оси ординат откладывают 10%, а на оси абсцисс — соответственно размер диаметра в мм. Пользоваться этой величиной можно только для легких почв и при условии, если коэффициент однородности будет не больше 5. Коэффициент однородности

$$e = \frac{D_{60}}{D_{10}},$$

$D_{60}$  есть диаметр частиц, меньше которого в почве имеется 60% частиц по весу. Определяется также по интегральной кривой.

Таблица 14

Пример расчета действующего диаметра по Козени

Размер частиц в мм	Содержание их в %	Расчет знаменателя формулы Козени
1—0,25	6,0	$\frac{1}{2} \cdot 6 \left( \frac{1}{1} + \frac{1}{0,25} \right) = 15,0$
0,25—0,05	14,0	$\frac{1}{2} \cdot 14 \left( \frac{1}{0,25} + \frac{1}{0,05} \right) = 168,0$
0,05—0,01	30,0	$\frac{1}{2} \cdot 30 \left( \frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,01} \right) = 1800$
0,01—0,005	10,0	$\frac{1}{2} \cdot 10 \left( \frac{1}{0,01} + \frac{1}{0,005} \right) = 1500$
0,005—0,001	10,0	$\frac{1}{2} \cdot 10 \left( \frac{1}{0,005} + \frac{1}{0,001} \right) = 6000$
< 0,001	30,0	$\frac{1}{2} \cdot 30 \frac{1}{0,001} = 15000$

$$\Sigma = 24463$$

$$D_{эф} = \frac{100}{244863 + \frac{3}{2} \frac{30}{0,001}} = 0,0015 \text{ мм}$$

Для полидисперсных систем Козени предложил универсальную формулу определения действующего диаметра частиц:

$$D_{эф} = \frac{100}{\sum n \left[ \frac{1}{2} a \left( \frac{1}{D_{\kappa+1}} + \frac{1}{D_{\kappa}} \right) \right] + \frac{3a_{\min}}{2D_{\min}}}, \quad (11)$$

где 100 — сумма процентов всех фракций;

$\Sigma$  — знак суммирования;

$n$  — число фракций;

$a$  — процентное выражение каждой фракции;

$D_{\kappa+1}$  и  $D_{\kappa}$  — наибольший и наименьший диаметр данной фракции;

$D_{\min}$  — диаметр наиболее мелкой фракции, определенной при анализе;

$a_{\min}$  — процент наиболее мелкой фракции.

Пример расчета см. в табл. 14.

## ГЛАВА II

### АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОЧВЫ

Под структурой почвы понимают совокупность отдельных частей, или агрегатов, различных по величине, форме, прочности и связности. Структурная отдельность, или агрегат, представляет собой совокупность первичных почвенных частиц, соединенных друг с другом в результате коагуляции коллоидов, склеивания, слипания.

Способность почвы распадаться на структурные отдельности, или агрегаты, называют структурностью почвы.

Различают два понятия структуры почвы: морфологическое и агрономическое. В морфологическом понимании хорошей будет всякая, четко выраженная структура: ореховатая, столбчатая, призмовидная, пластинчатая и т. п. Каждой генетически различной почве, а внутри ее отдельным горизонтам присуща своя, характерная структура. Ее формирование тесно связано с условиями образования данного почвенного типа.

Агрономически ценной является только такая структура, которая обеспечивает плодородие почвы.

В настоящее время почвенную структуру по размерам агрегатов подразделяют следующим образом:

1. Глыбистая структура (агрегаты  $> 10$  мм).
2. Комковато-зернистая структура, или макроструктура (агрегаты  $10 - 0,25$  мм).
3. Микроструктура (агрегаты  $< 0,25$  мм).

П. А. Костычевым было предложено классифицировать структуру почвы на водопрочную (агрономически ценную) и неводопрочную. Позднее, развивая это положение, В. Р. Вильямс предложил различать два свойства почвенных агрегатов: связность и прочность. Под связностью понимается способность агрегата противостоять механической силе воздействия, а под прочностью — способность агрегата длительно противостоять размывающему действию воды.

Связность почвы зависит от количества иловатых и, особенно, коллоидальных частиц. Прочность агрегата зависит только от качества перегноя (она обусловлена цементацией механических элементов свежесажженным перегноем).

Комочек почвы может быть связанным, но не прочным. Для примера возьмите комочек сухой глины — его трудно разрушить рукой, но, если его положить в воду, он быстро распадается на составляющие его механические элементы.

Агрономически ценной считается водопрочная структура, создание которой и является задачей агротехнических приемов и мероприятий, направленных на оструктурирование почвы. Надо помнить, что не всякая водопрочная структура является агрономически ценной. Водопрочность почвенной структуры имеет двойную природу: во-первых, водопрочность может быть обусловлена стойким химическим и физико-химическим закреплением коллоидов (необратимая коагуляция коллоидов). Во-вторых, агрегаты могут быть водопрочны в результате неводопроницаемости их, связанной с наличием, в основном, тонких пор.

Структура почвы является одним из главнейших факторов ее плодородия. В структурной почве создаются оптимальные условия водного, воздушного и теплового режимов, что в свою очередь обуславливает развитие микробиологической деятельности, мобилизацию и доступность питательных веществ для растений.

Структурная почва имеет высокую порозность и влагоемкость. Благодаря хорошей водопроницаемости, она глубоко промачивается водой. Осадки, выпадающие на структурную почву, полностью впитываются. Поверхностный сток отсутствует, следовательно, исключены эрозионные процессы. Во влажной структурной почве, благодаря наличию капиллярных пор внутри агрегатов и пор аэрации между ними, одновременно совмещаются анаэробные и аэробные процессы. Внутри агрегатов, когда капиллярные поры заняты водой, протекают анаэробные процессы, сопровождающиеся образованием ульминовой кислоты. В это же время в порах аэрации, на поверхности комков, идут процессы в аэробных условиях с образованием гуминовой кислоты и минеральных соединений, нужных для питания растений.

В бесструктурной распыленной почве складывается неблагоприятный физический режим. Вода и воздух в ней являются антагонистами. Порозность и влагоемкость представлены малыми величинами. Вследствие плохой водопроницаемости бесструктурная почва плохо впитывает воду, сток ее по поверхности приводит к эрозии. Плохая водопроницаемость, малая влагоемкость не обеспечивают достаточных запасов воды. Весной и осенью поры в такой почве бывают заполнены водой, а воздух в них отсутствует. С повышением же температуры, благодаря тонкопористому сложению, происходит интенсивное испарение воды и просушивание почвы на большую глубину. Растения в этот период страдают от засухи. После дождя или полива

поверхность бесструктурной почвы заплывает, резко повышается липкость. При высыхании почва сильно уплотняется, утяжеляется ее обработка, затрудняется рост и развитие корневой системы растений. Обесструктуренные почвы легко подвергаются ветровой эрозии.

Борьба за структуру (в агрономическом смысле) в пахотном слое есть борьба за повышение урожая сельскохозяйственных культур. К созданию структуры привлекают биологические, химические, физико-химические, физические и механические методы. Большое внимание уделяют методам оструктурирования почв с помощью искусственных структуров и, в частности, полимерных соединений.

В последнее время большое внимание исследователи уделяют разработке и усовершенствованию методов определения качества структуры, ее водопрочности и механической прочности.

Существующие методы изучения структуры почвы можно подразделить на группы:

1. Морфологическое описание структуры;
2. Изучение качества структуры: водопрочности и механической прочности;
3. Выяснение природы водопрочности и механической прочности почвенного агрегата путем изучения его строения и причин, обуславливающих связь между отдельными первичными почвенными частицами.

При проведении исследований структуры почвы следует иметь в виду, что:

1. Анализы структуры в целях ее агрономической оценки проводят, обычно, для пахотного и подпахотного горизонтов, причем пахотный горизонт характеризуют на всю глубину образцами по 10 см (0—10, 10—20) и т. д.
2. Структура почвы верхних горизонтов динамична во времени, и результаты анализов, взятых в разные сроки, будут различны.
3. Образец почвы, взятый для анализа, должен быть сохранен в ненарушенном состоянии.

Существует различное мнение о том, в каком состоянии влажности образец следует анализировать. Многие исследователи считают, что сухие образцы менее водопрочны. Это объясняется разрушающей ролью заземленного воздуха, поэтому рекомендуется образцы перед анализом предварительно смачивать.

## **МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУКТУРЫ**

Первая характеристика оструктуренности почвы, типа структуры и, в некоторой мере, ее агрономической ценности дается при визуальном описании почвенного профиля или пахотного горизонта.

Полная классификация структурных элементов для морфологического описания дана профессором С. А. Захаровым, ею и нужно руководствоваться в работе (рис. 16, табл. 15).

Таблица 15

Классификация структурных элементов по Захарову С. А.

Тип I. Кубовидная

	Род	Вид	Размеры в мм
I	Глыбистая — неправильная форма и неровная поверхность. Грани и ребра плохо выражены	1. Крупноглыбистая 2. Мелкоглыбистая	> 100 100—50
II	Комковатая — неправильная форма; неровные, округлые и шероховатые поверхности	1. Крупнокомковатая 2. Комковатая 3. Мелкокомковатая 4. Пылеватая	50—30 30—10 10—0,5 < 0,5
III	Ореховатая — более или менее правильная форма; поверхность граней сравнительно ровная. Грани и ребра острые. Грани и ребра хорошо выражены	1. Крупноореховатая 2. Ореховатая 3. Мелкоореховатая	> 10 10—7 7—5
IV	Зернистая — более или менее правильная форма, иногда округлая с гранями, то шероховатыми и матовыми, то гладкими и блестящими	1. Крупнозернистая (гороховатая) 2. Зернистая (крупитчатая) 3. Мелкозернистая (порошистая)	5—3 3—1 1—0,5

Тип II. Призмовидная

	Род	Вид	Длина горизонтальной оси — поперечный диаметр в мм
V	Грани и ребра плохо выражены <b>Столбовидная</b> — неправильной формы, со слабо выраженными неровными гранями и округлыми ребрами	1. Крупностолбовидная 2. Столбовидная 3. Мелкостолбовидная	> 50 50—30 < 30

	Род	Вид	Длина гори- зонтальной оси — попе- речный ди- аметр в мм
VI	Грани и ребра хорошо выражены <b>Столбчатая</b> — правильной фор- мы, с довольно хорошо выра- женными гладкими боковыми вертикальными гранями с округлым верхним основанием («головкой») и плоским—ниж- ним	1 Крупностолбчатая	> 50
		2 Столбчатая	50—30
		3 Мелкостолбчатая	< 30
VII	<b>Призматическая</b> — с ровными часто глянцевыми поверх- ностями, с острыми ребрами	1 Крупнопризматиче- ская	> 50
		2 Призматическая	50—30
		3 Мелкопризматическая	< 30
		4 Карандашная — при длине от 5 до 10 мм	< 10

## Тип III Плитовидная

VIII	Плитчатая — слоистая, с более или менее развитыми гори- зонтальными «плоскостями спайности», часто различно окрашенными и разного ха- рактера поверхностями	1 Станцеватая	> 50
		2 Плитчатая	5—3
		3 Пластинчатая	3—1
		4 Листоватая	< 1
IX	Чешунчатая — с сравнительно небольшими, отчасти изогну- тыми горизонтальными пло- скостями спайности и часто острыми ребрами (некоторое сходство с ешуй рыбы)	1 Скорлуповатая	толщина } > 3 3—1 < 1
		2 Грубочешуйчатая	
		3 Мелкочешуйчатая	

Для определения водопрочности и механической прочности структуры получили распространение следующие методы

1) микроагрегатный анализ по Качинскому, 2) метод Саввина, основанный на фракционировании почвы в воздушно сухом состоянии и воде, 3) макроагрегатный анализ методом качания сит (И. М. Бакшеева), 4) метод Фадеева — Вильямса, 5) метод Андрианова, 6) капельный метод Виленского, 7) метод Виленского для определения механической прочности агрегатов, 8) методы для определения порозности почвенного агрегата а) метод фиксирования (парафинирования) и гидростатического взвешивания, б) метод микроскопирования (метод шлифов), 9) метод Антипова Каратаева, Келлерман и Хана для определения связей между минеральной и органической частями почвы

Методы определения водопрочности почвенной структуры можно подразделить на две группы прямые и косвенные

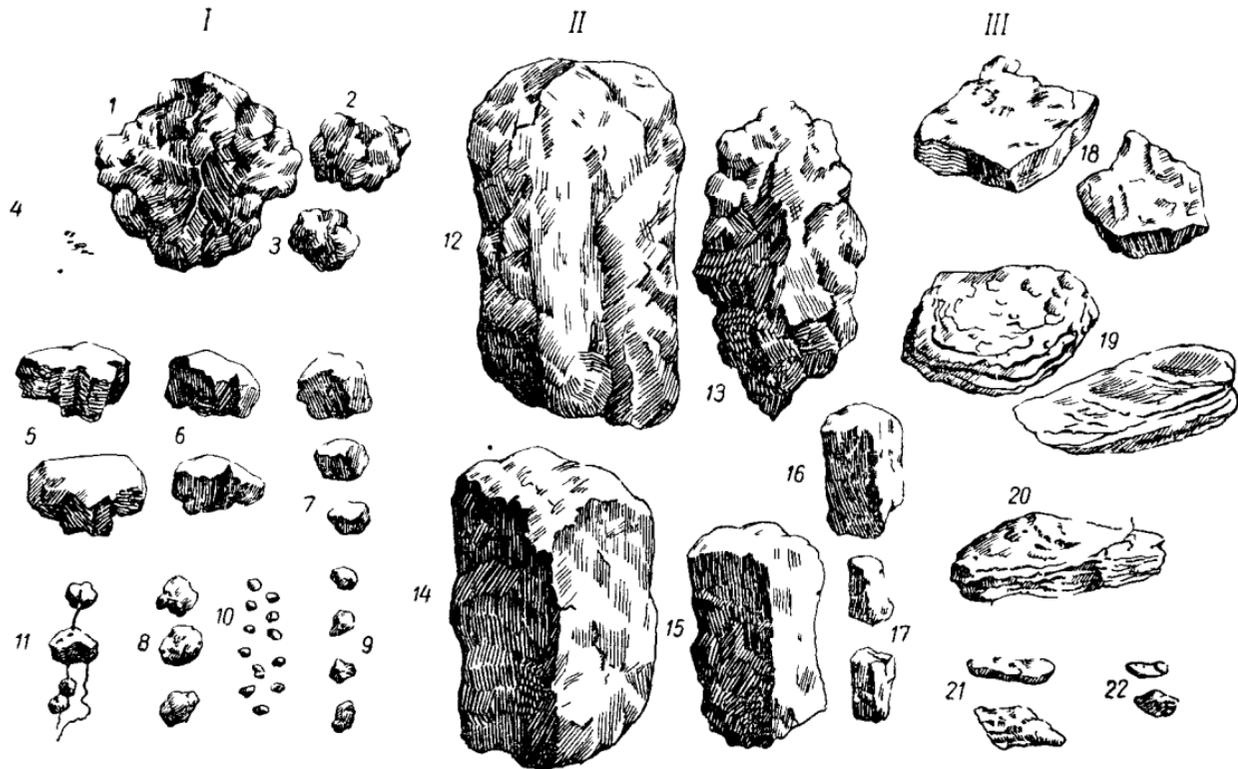


Рис 16 Схема типичных видов почвенной структуры (по С А Захарову)

*I* — кубовидный тип структуры 1 — крупнокомковатая 2 — комковатая 3 — мелкокомковатая 4 — пылеватая 5 — крупноореховатая 6 — ореховатая 7 — мелкоореховатая 8 — крупнозернистая 9 — зернистая 10 — порошистая 11 — структурные отделности наназанные на корни, *II* — призмвидный тип структуры 12 — столбчатая 13 — столбовидная 14 — крупнопризматическая 15 — призматическая 16 — мелкопризматическая 17 — тонкопризматическая, *III* — плитовидный тип структуры 18 — сланцеватая 19 — пластинчатая 20 — листоватая 21 — чешуйчатая 22 — мелкочешуйчатая

Прямыми методами непосредственно определяется количество водопрочных и неводопрочных агрегатов. К ним можно отнести: методы фракционирования почвы на ситах по Саввинову, макроагрегатный анализ методом качания сит (Бакшеева), метод размокания в стоячей воде, микроагрегатный анализ по Качинскому и др.

К косвенным относятся такие методы, когда о водопрочности судят по другому показателю, например по изменению водопоглощаемости (метод Вильямса), по количеству воды, необходимой для размывания агрегата (капельный метод Виленского).

### Микроагрегатный анализ

Благоприятный физический режим в почве создается благодаря наличию не только макро-, но и микроструктуры. В последнее время все большее значение придается микроагрегатному состоянию почвы. Поэтому для агрономической оценки почвы важно знать как степень оструктуренности, так и качество макро- и микроагрегатов в ней. Характеризуя микроструктуру, можно делать оценку и макроструктуры.

Микроагрегатный анализ рекомендуется проводить для пахотных горизонтов, параллельно с механическим анализом, чтобы потом по результатам механического и микроагрегатного анализов оценивать оструктуренность и распыленность почв и судить о потенциальной способности почв к оструктуриванию.

**Микроагрегатный анализ почвы по методу Качинского.** Из коробочного образца почвы, доведенного до воздушно-сухого состояния, берут среднюю пробу 100—150 г, осторожно растирают в фарфоровой ступке пестиком с каучуковым наконечником и просеивают через сито с диаметром отверстий в 1 мм. Из подготовленной почвы берут навески: для определения микроагрегатного состава — 10—15 г и для определения гигроскопической влажности — 4—5 г.

Навеску почвы для микроагрегатного анализа помещают в бутылку емкостью 500 см<sup>3</sup> (используют широкогорлые бутылки). В бутылку наливают 250 см<sup>3</sup> дистиллированной воды и почву оставляют размокать на 24 час. После этого бутылку, закрытую резиновой пробкой, помещают на мешалку и в течение 2 час встряхивают горизонтальными толчками (180 ударов в минуту в одну сторону). Содержание бутылки через сито с отверстиями  $d=0,25$  мм переносят в литровый цилиндр, доливают дистиллированной водой до 1000 см<sup>3</sup>. Из приготовленной дисперсии пипеткой берут пробы. Операции по взятию проб дисперсии, дальнейшей их обработки, расчет фракции в процентах проводят так же, как при механическом анализе (см. I гл. Метод Н. А. Качинского).

При микроагрегатном анализе почв засоленных, солонцеватых, солонцов и солончаков вместо дистиллированной воды используют водную вытяжку из данной почвы.

Водную вытяжку из анализируемой почвы получают при отношении почвы к воде, равном 1:25. Вытяжка получается в тех же условиях, в каких ведется микроагрегатный анализ: 40 г почвы, пропущенной через сито с диаметром отверстий в 1 мм, помещают в бутылку емкостью несколько больше литра, заливают 1000 см<sup>3</sup> воды и выдерживают 24 час. Затем встряхивают в течение 5 мин, отфильтровывают. Полученная вытяжка заменяет дистиллированную воду во всех процессах анализа: размачивание почвы, перенос из бутылки в цилиндр, доливание цилиндра (несколько кубических сантиметров жидкости, недостающих в цилиндре до литра, восполняются дистиллированной водой).

Следует иметь в виду, что в результате микроагрегатного анализа почва бывает несколько переутяжелена, так как скорости падения в воде микроагрегатов принимают по Стоксу так же, как и для механических элементов. На самом же деле, микроагрегаты того же размера, что и механические элементы, падают медленнее, так как они более рыхлого сложения и, следовательно, имеют меньший вес.

Коэффициенты дисперсности и структурности почвы. Вычисляются по данным микроагрегатного и механического анализов почвы. Предложено несколько формул для вычисления:

1. «Фактор дисперсности» по Н. А. Качинскому характеризует степень разрушения микроагрегатов в воде и выражается процентным отношением ила (частиц < 0,001 мм) «микроагрегатного» к илу «механическому»:

$$K = \frac{a}{b} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где  $a$  — количество ила в % при микроагрегатном анализе,  
 $b$  — количество ила в % при механическом анализе.

Пример:  $a = 5\%$       $K = \frac{5}{25} \cdot 100 = 20\%$ .  
 $b = 25\%$

Чем выше фактор «дисперсности», тем менее прочна микроструктура почвы. Для обыкновенного глинистого чернозема «фактор дисперсности» не превышает 10%, а для столбчатого горизонта солонца может быть равен 80%.

2. «Фактор структурности» по Фагелеру характеризует водостойчивость агрегатов.

Рассчитывается по формуле:

$$K_c = \frac{(b-a)}{b} \cdot 100, \quad (13)$$

где  $a$  — количество ила в % при микроагрегатном анализе;  
 $b$  — количество ила в % при механическом анализе.

Если  $a = 5\%$       $K_c = \frac{25-5}{25} \cdot 100 = 80\%$ .  
 $b = 25\%$

Как видно из приведенных примеров, сумма количественных выражений «фактора дисперсности» и «фактора структурности» равна 100%. Таким образом, зная величину одного «фактора» легко рассчитать другой.

3. Степень агрегатности по Бэйверу и Родесу:

$$K = \frac{(e-a)}{e} \cdot 100, \quad (14)$$

где  $a$  — количество необратимых микроагрегатов  $> 0,05$  мм при микроагрегатном анализе,

$e$  — количество механических элементов  $> 0,05$  мм при механическом анализе.

Повышение «степени агрегатности» означает улучшение водопрочности структуры. В вышерассмотренных формулах используются данные двух анализов — микроагрегатного и механического.

А. Ф. Вадюниной предложена формула расчета «гранулометрического показателя структурности» по результатам только механического анализа.

Механические элементы при этом разделяются на активные, принимающие участие в коагуляции, и пассивные, участвующие в структурообразовании как пассивный материал.

В гумусных почвах активное участие в коагуляции принимает ил и большая часть мелкой пыли. В почвах малогумусных, например подзолистых, активной частью является только ил.

Исходя из этого формулы расчета «гранулометрического показателя структурности» имеют вид: для гумусных почв

$$P_c = \frac{a+e}{c}, \quad (15)$$

для малогумусных почв

$$P = \frac{a}{e+c}, \quad (16)$$

где  $a$  — количество ила в %;

$e$  — количество мелкой пыли в %;

$c$  — количество средней и крупной пыли в %.

Чем выше «гранулометрический показатель структурности», тем больше потенциальная способность почвы к оструктурированию.

### Методы определения водопрочности макроструктуры почв

**Метод Н. И. Саввинова.** Разработан на основе методов Г. И. Павлова и А. Ф. Тюлина и является в настоящее время одним из распространенных в почвенной практике. Состоит из двух частей: 1) фракционирование почвы на ситах в воздушно-сухом состоянии (сухое просеивание) и 2) фракционирование на

ситых в воде (мокрое просеивание). Сухим просеиванием фиксируется количество агрегатов того или иного размера в почве. Мокрым просеиванием определяется количество водопрочных агрегатов, т. е. дается качественная оценка структуры по водопрочности.

1. Фракционирование почвы в воздушно-сухом состоянии (сухое просеивание). Из образца почвы, доведенного в лаборатории до воздушно-сухого состояния, берут

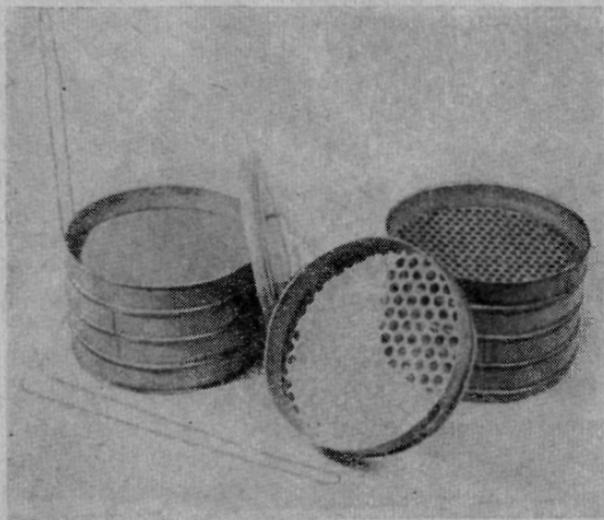


Рис. 17. Набор сит для просеивания почвы

среднюю пробу до  $2,5 \text{ кг}^1$  и рассеивают на ситах с диаметрами отверстий 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0,5, 0,25 мм. Набор сит должен иметь поддон, в котором собирается фракция  $< 0,25 \text{ мм}$ , и крышку для предохранения от распыления почвы при просеивании (рис. 17).

Анализируемую почву небольшими порциями помещают на верхнее, самое крупное, сито и осторожными наклонами всего набора сит рассеивают. Не следует сита сильно встряхивать. При разъединении каждое сито еще раз встряхивают осторожным постукиванием по его ребру ладонью руки, для того чтобы освободить из отверстий застрявшие в них агрегаты. Сухим просеиванием почва разделяется на фракции:  $> 10 \text{ мм}$ , 10—7 мм, 7—5 мм, 5—3 мм, 3—2 мм, 2—1 мм, 1—0,5 мм, 0,5—0,25 мм и  $< 0,25 \text{ мм}$ .

Каждую фракцию агрегатов отдельно собирают, взвешивают и рассчитывают ее процентное содержание. Фракцию  $< 0,25 \text{ мм}$

<sup>1</sup> В том случае, если не имеется такого количества почвы, навеска допускается до 0,5 кг, но не менее.

рассчитывают по разности между взятой для анализа почвой и суммой фракции  $> 0,25$  мм. За 100% принимается вся взятая для анализа навеска. Полученные данные оформляют в таблицу и графически (см. ниже).

2. Фракционирование почвы в воде или определение водопрочности агрегатов (мокрое просеивание). Для определения водопрочности составляют среднюю пробу в 50 г из всех фракций агрегатов, полученных при сухом просеивании. Для этого каждая фракция берется в количестве, равном в граммах половине процентного содержания ее в данной почве. Например: при содержании в почве 22% фракции 5—3 мм для средней пробы ее берут 11 г, при содержании 15% фракции 3—2 мм берут 7,5 г и т. д.

В среднюю пробу фракцию  $< 0,25$  мм не берут (так как она будет забивать мелкие сита), в таком случае средняя проба получится меньше 50 г.

Среднюю пробу осторожно высыпают в литровый цилиндр наполненный водой на  $\frac{2}{3}$  объема. Цилиндры употребляются такие же, как и для механического анализа (высота около 45 см, диаметр 7 см). Удобно работать с цилиндром без носика и с притертым верхним краем.

Погруженную в цилиндр с водой почвенную пробу оставляют в покое на 10 мин. Это необходимо для того, чтобы из почвы вышел весь воздух, находящийся в агрегатах и между ними. Для ускорения вытеснения воздуха через 1—2 мин, цилиндр доливают водой до самого верха, закрывают стеклом или пробкой, наклоняют до горизонтального положения и опять ставят вертикально. Это повторяют дважды.

Через 10 мин цилиндр, прикрытый стеклом или пробкой, переворачивают вверх дном и удерживают в таком положении несколько секунд, пока главная масса агрегатов не упадет вниз; затем цилиндр вновь переворачивают и выжидают пока почва не достигнет дна. После десяти полных оборотов закрытый цилиндр опрокидывают над набором сит, стоящих в воде в широкой цилиндрической ванне (рис. 18).

Для мокрого просеивания используют сита диаметром 20 см и высотой борта 3 см. Набор составляют из сит с диаметром отверстий: 5; 3; 2; 1; 0,5; 0,25 мм, скрепленных металлическими пластинками или проволочными дужками. Слой воды в ванне должен быть на 5—6 см выше борта верхнего сита.

Опрокинутый в воду цилиндр быстро открывают и плавными движениями цилиндра, не касаясь краем дна сита и не отрывая его от воды, распределяют почву по поверхности сита. Через 50—60 сек, когда все отдельные крупнее 0,25 мм упадут на сито, цилиндр в воде закрывают и вынимают. Оставшуюся в цилиндре часть фракции  $< 0,25$  мм не сохраняют, так как она рассчитывается в дальнейшем по разности. Перенесенную на сито почву просеивают; за ручки сита медленно поднимают на

5—6 см, не обнажая комков почвы на верхнем сите, и быстро опускают вниз на 3—4 см, выжидают 2—3 сек, пока комочки почвы, поднявшиеся по инерции во время опускания, не упадут на дно сита, затем опять медленно поднимают на 3—4 см и быстро опускают на ту же глубину. Так повторяют 10 раз, затем снимают два верхних сита, не вынимая всего набора из воды, а остальные встряхивают еще 5 раз и вынимают из воды.

Оставшиеся на сите агрегаты смывают струей воды из промывалки (или слабой струей из шланга, соединенного с водопроводным краном) сначала в большую фарфоровую чашку, из нее после удаления воды декантацией, в чашку среднего размера (диаметром 15 см) и, наконец, во взвешенную малую фарфоровую чашку или алюминиевый стакан. После отстаивания воду из чашки или стакана сливают, оставшуюся часть воды выпаривают на водяной бане или электроплитке.

Содержание фракций рассчитывают на воздушно-сухую или абсолютно сухую навеску. В первом случае чашки или стаканчики с фракциями после подсушивания на водяной бане оставляют открытыми на воздухе и периодически взвешивают до получения постоянного веса. Если расчет ведут на абсолютно сухую почву, то фракции в стаканчиках с крышками высушивают в сушильном шкафу в течение 6 час и затем еще 2 час для контроля. При этом необходимо знать влажность почвы, взятой для анализа, чтобы рассчитать абсолютно сухую навеску. Для этого одновременно со взятием навески для просеивания берут средние пробы этой почвы для определения влажности.

Так как для определения водопрочности берут среднюю пробу в 50 г (половину процентного содержания фракций, полученных при сухом просеивании), то при расчете вес каждой фракции в граммах умножают на 2 и получают процентное содержание соответствующих водопрочных агрегатов в почве.

Наличие в почве механических элементов крупнее 0,25 мм (крупный песок, гравий и т. п.) искажает результаты агрегатного анализа. В таком случае поступают следующим образом: после взвешивания фракцию помещают в фарфоровую чашку,

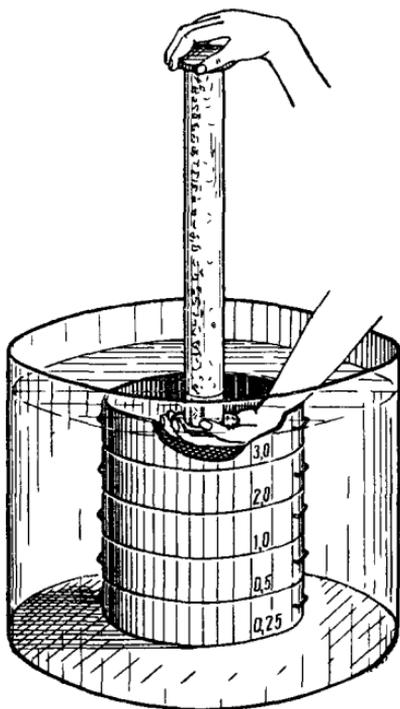


Рис. 18. Установка для фракционирования почвы на ситах в воде

заливают водой и растирают каучуковой пробкой. Разрушив агрегаты, содержимое чашки переносят на сито с диаметром отверстий, соответствующим размеру данной фракции, и промывают водой. Затем подсушивают до воздушно-сухого состояния и взвешивают. Вычитая из первоначального веса фракции вес механических элементов этого размера, получают вес агрегатов, а затем пересчитывают в %.

Для каждого исследуемого образца определения производят с двойным, а в некоторых случаях и с большим контролем.

Данные, полученные при фракционировании почвы в воздушно-сухом состоянии и в воде, оформляют в виде таблицы (см. табл. 16) и графика.

При построении графика по оси абсцисс откладывают размер фракций, начиная с более крупной, по оси ординат — содержание фракций в процентах.

**Вариант структурного анализа Вершинина и Ревута.** Сухое рассеивание на ситах и составление средней навески в 50 г производят по методу Саввинова, затем навеску для мокрого просеивания переносят на верхнее сито, закрытое фильтровальной бумагой. Набор сит с почвой устанавливают в сосуд для встряхивания, осторожно наливают воду так, чтобы над верхним ситом был слой в 10 см. Почву выдерживают в воде один час, после чего осторожно ссыпают с бумаги на сито и просеивают в воде (как это было описано выше). В этом варианте исключается замачивание и взбалтывание почвы в цилиндре.

Для определения водопрочности при полевой влажности берут образец почвы 50—100 г и анализируют так же, как и навеску почвы для мокрого просеивания. Чтобы иметь суждение о водопрочности структуры в зависимости от влажности, для каждой почвы можно провести анализы на водопрочность при разных степенях увлажнения, на основании данных построить

Таблица 16  
Форма записи результатов

Название почвы	Горизонт, глубина в см	Размер фракций				
		>10	10—7	7—5	5—3	
		Сухое	Сухое	Сухое	Сухое	Мокрое
Чернозем южный маломощный легкоглинистый пылевато-иловатый . . . . .	A <sub>1</sub> (18—26)	61,02	6,94	6,31	6,94	0,50

кривую, в которой по ординате откладывают количества водопрочных агрегатов, по оси абсцисс — влажность почвы.

Необходимое оборудование: набор сит, большая цилиндрическая ванна, ванночка с низким бортом, большая фарфоровая чашка, малые фарфоровые чашки или алюминевые стаканчики, промывалка, водяная баня, технические весы с разновесом.

**Макроагрегатный анализ почв методом качания сит.** По этому методу навеска почвы также рассеивается в воде. В отличие от метода Саввинова в нем ручное качание заменено механическим качанием сит с помощью электромотора, что устраняет элемент субъективности в производстве анализа. Метод разработан И. М. Бакшеевым под руководством М. Г. Чижевского. Ими был предложен и прибор, впоследствии усовершенствованный А. Н. Киселевым и В. П. Некрасовым.

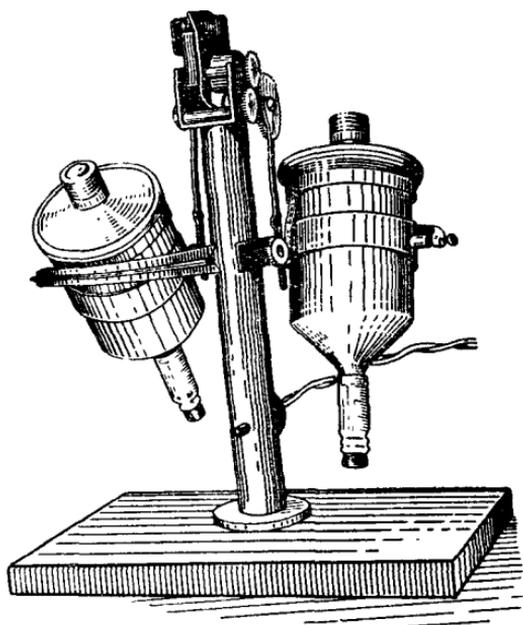


Рис. 19. Прибор Бакшеева для агрегатного анализа

Описание прибора (рис. 19). На полый стойке, укрепленной на металлической подставке, имеется два круглых гнезда, в каждое из которых вставлен металлический цилиндр.

#### анализа по методу Саввинова

в мм (сухое и мокрое просеивание)

3—2		2—1		1—0,5		0,5—0,25		< 0,25	
Сухое	Мокрое	Сухое	Мокрое	Сухое	Мокрое	Сухое	Мокрое	Сухое	Мокрое
5,09	1,39	3,96	6,31	3,48	18,32	2,20	22,44	4,06	51,04

Вверху стойки смонтирован мотор на 120 или 220 в. В нижней ее части имеется штепсельная розетка для подключения прибора в электрическую сеть и кнопка для включения прибора в действие.

Гнезда для цилиндров подвижные и посредством шатуна и шестеренок связаны с мотором. С включением мотора цилиндры начинают совершать качательное движение в ту и другую стороны под углом 45°. Прибор может работать на двух скоростях: одно качание в минуту и два качания в минуту. Для перевода с одной скорости на другую имеется две шестеренки разных диаметров. Обычно анализируют при скорости одно качание в минуту.

Дно цилиндра конусообразной формы, в центре имеет отводную трубку — «хоботок», сделанную из небьющегося стекла и градуированную на миллиметровые деления. Нижнее отверстие «хоботка» закрывают резиновой пробкой. В процессе анализа в «хоботок» оседают частицы почвы меньше 0,25 мм.

Сверху цилиндр герметически закрывается навинчивающейся крышкой с резиновой или асбестовой прокладкой для предохранения от просачивания воды при работе прибора. В центре крышки два отверстия, закрывающиеся общим навинчивающимся колпачком. Одно отверстие служит для выхода воздуха из цилиндра при наполнении его водой. Через второе отверстие наливается вода.

В цилиндр вставляют набор сит с диаметром отверстий 5; 3; 1; 0,5; 0,25 мм (используют сита диаметром 10—12 см). Сита скреплены между собой, верхнее из них имеет ручку. Взяв за эту ручку и поворачивая против часовой стрелки, набор сит вводят в цилиндр или вынимают из него.

Для того чтобы поместить почву в цилиндры или вынуть из них после окончания анализа, их вынимают из гнезда прибора и устанавливают в гнезда деревянных подставок или реек, применяемых для установки воронок при фильтровании.

Наличие в приборе двух цилиндров дает возможность работать с двумя образцами. Перед началом анализа необходимо проверить работу прибора.

**Х о д а н а л и з а.** Среднюю пробу почвы в количестве 1—2 кг, доведенную до воздушно-сухого состояния, предварительно рассеивают на ситах с диаметром отверстий 5; 3; 1; 0,5; 0,25 мм. Из полученных структурных фракций по принципу, предложенному Саввиновым составляют навеску для анализа весом 25 г. Частицы почвы меньше 0,25 мм в навеску не берут, во избежание засорения мелких сит, но в сумму 25 г они должны входить. Одновременно готовят две средних навески для повторных определений. Проверяют работу прибора и после этого цилиндры вынимают из гнезд и устанавливают на подставки. Свинчивают крышки, снимают с них колпачки. В цилиндры наливают воду до половины высоты бортика верхнего сита. Поворачивая

набор сит в цилиндре против часовой стрелки, удаляют воздух, который может остаться под мелкими ситами.

После этого переносят навеску почвы на верхнее сито. Цилиндр закрывают крышкой, в отверстие крышки наливают воду до полного заполнения цилиндра и закрывают отверстия колпачком. Цилиндры вставляют в гнезда прибора, включают мотор и замечают время начала качания. Продолжительность качаний установлена в 12 мин. По окончании качаний прибор выключают, цилиндры вынимают и устанавливают на подставке. Под каждый цилиндр подставляют сосуд. Вынимают пробку из «хоботка» цилиндра и воду с находящимися в ней частицами почвы меньше 0,25 мм сливают и собирают в подставленный сосуд.

Если требуется определить содержание частиц  $< 0,25$  мм, то собранную суспензию профильтровывают и остаток высушивают.

С цилиндров свинчивают крышки и вынимают сита, для чего следует взять за ручку сита и повернуть весь набор против часовой стрелки. Набор сит разбирают и почву с каждого сита смывают в отдельные фарфоровые чашки или алюминиевые стаканчики. Для смывания можно использовать промывалку или резиновый шланг, соединенный с водопроводным краном. Не следует смывать сильной струей.

Для сбора фракции можно использовать плотные фильтры. Фильтр (диаметром 12,5 см) помещают в воронку и предварительно смачивают водой. Под воронку с фильтром ставят стакан или другой сосуд, а над воронкой помещают большую широкогорлую воронку, через которую и переносят фракцию с сита на фильтр. Фракцию высушивают до воздушно-сухого или абсолютного сухого состояния и рассчитывают содержание в процентах так же, как в методе Саввинова.

Полученные результаты оформляют в виде таблицы и графика по образцу, приведенному в описании метода Саввинова.

Необходимое оборудование: прибор, набор сит для сухого просеивания образца, весы технические, разновески, фарфоровые чашки, алюминиевые стаканчики или воронка и фильтры, стаканы, промывалка или каучуковая трубка, сушильный шкаф или водяная баня, часы.

**Определение размываемости агрегатов по методу Д. Г. Виленского.** Этим методом определяют водоустойчивость отдельного агрегата путем действия на него капель воды.

Д. Г. Виленский сконструировал специальный прибор (рис. 20), который состоит из широкой горизонтальной трубки с отверстиями и сосуда Мариотта. К отверстиям присоединены узкие, изогнутые коленом трубки с суженным кончиком. Каждая трубка имеет два крана; верхним краном регулируют скорость вытекания воды, нижний кран служит для спуска воды. Вода поступает из сосуда Мариотта в широкую трубку и вытекает

каплями через отверстия узких трубок. Скорость вытекания воды принята 2 капли в секунду при объеме капель 0,03 мл.

Ниже широкой трубки, под кранами, закрепляют приспособление из двух стеклянных трубок диаметром 10 мм, соединенных металлическими обоймами так, что щель между ними равна точно 1 мм. Под трубками, против каждого крана, устанавливают мерные цилиндры емкостью 100 см<sup>3</sup>.

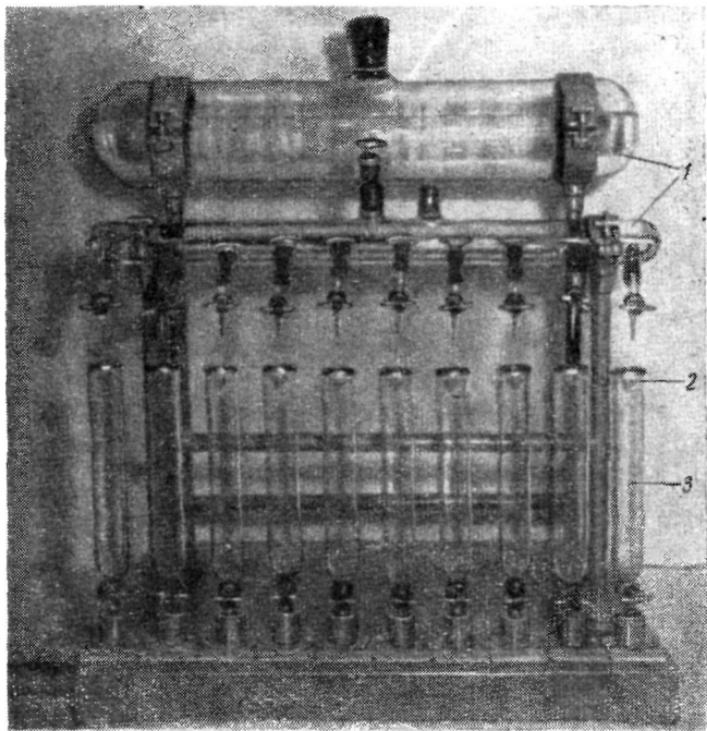


Рис. 20. Прибор Виленского для определения водоустойчивости почвенных агрегатов (последней конструкции)

1 — резервуары для воды, 2 — спираль для закрепления агрегата, 3 — мерный цилиндр

**Ход анализа.** Для испытания на водоустойчивость берут 50 агрегатов определенного размера. Рекомендуется брать среднюю по размерам фракцию 3—5 мм. Испытываемые образцы помещают на трубку над щелью по одному против каждого крана. Расстояние между кончиком крана и агрегатом должно быть 5 см. Воду, использованную для размывания каждого агрегата, собирают отдельно в мерные цилиндры емкостью 100 см<sup>3</sup> и учитывают. Размывание заканчивают, когда все частицы почвы прошли через щель в 1 мм. Водоустойчивость определяют количеством воды в см<sup>3</sup>, затраченной на полное размывание одного агрегата.

Из данных по 50 агрегатам выводится средняя величина

водоустойчивости фракции данного размера. Суспензия, собранная в цилиндры, может быть проанализирована далее методом фракционирования на ситах и методом пипетки. Полученные результаты позволят судить о степени разрушения агрегатов при размывании.

**Определение водопрочности почвенных агрегатов в стоячей воде.** Метод основан на учете количества расплывшихся почвенных агрегатов в стоячей воде в определенные интервалы времени. Он был предложен Андриановым П. И., но в настоящее время значительно переработан проф. Н. А. Качинским: усовершенствована методика анализа и дан совершенно новый принцип расчета.

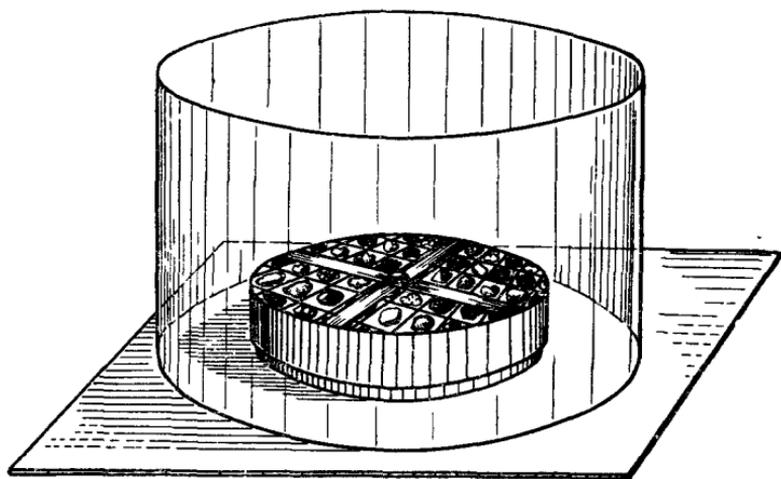


Рис. 21. Определение водопрочности структуры почвы в стоячей воде

**Ход работы.** Образец почвы в воздушно-сухом состоянии просеивают на ситах для разделения на фракции по крупности (как было описано выше). Для определения водопрочности берут агрегаты одного, обычно, среднего размера (3—5 мм).

В кристаллизатор помещают сито ( $d=20$  см) с диаметром отверстий 2 или 3 мм. Сито закрывают кружком фильтровальной бумаги, разграфленной на клетки (1 см<sup>2</sup>). По линии клеток иглой делают отверстия. Чтобы избежать поднятия бумаги во время смачивания водой, на нее накладывают прижимное кольцо. Кольцо вырезают из листа нержавеющей металла толщиной 1,5—2 мм. Диаметр кольца равен внутреннему диаметру сита, ширина обода 5—6 мм. К центру кольца сходятся четыре радиальные планочки, делящие площадь кольца на четыре сектора.

Для испытания на водопрочность берут 50 или 100 агрегатов, которые раскладывают правильными рядами, по одному в квадратик (рис. 21). В кристаллизатор наливают воду сначала в не-

большом количестве, чтобы лишь смочить бумагу. Агрегаты насыщают капиллярно в течение трех минут. После этого в кристаллизатор осторожно доливают воду в таком количестве, чтобы уровень ее был приблизительно на 0,5 см выше агрегатов. Используют воду комнатной температуры. Для удобства подсчетов расплывшихся агрегатов в рабочей тетради делают такую же сетку, как и на фильтрованной бумаге, и в клетках отмечают время расплывания соответствующего номера агрегата. Можно также на кристаллизатор наложить стекло с нанесенной сеткой и восковым карандашом отмечать расплывшиеся агрегаты. Каждую минуту подсчитывают число агрегатов, совершенно расплывшихся.

Общий срок наблюдений — 10 мин. В последнем отсчете, т. е. в десятую минуту наблюдения, учитывают не только количество совершенно расплывшихся агрегатов, но и количество агрегатов полураспавшихся.

За число агрегатов, совершенно расплывшихся в последнюю минуту наблюдения, принимают сумму из числа совершенно расплывшихся и половины агрегатов, затронутых процессом распада. Так как распад агрегатов в воде происходит в различное время и это характеризует степень водопрочности, то в расчет вводится поправочный коэффициент, который означает водопрочность агрегатов в процентах для каждой минуты отсчета; поправочный коэффициент для каждой минуты равен:

Для 1-ой минуты —	5%	Для 6-ой минуты —	55%
» 2	» — 15%	» 7	» — 65%
» 3	» — 25%	» 8	» — 75%
» 4	» — 35%	» 9	» — 85%
» 5	» — 45%	» 10	» — 95%

Коэффициент водопрочности агрегатов, не расплывшихся за 10 мин, равен 100%.

Водопрочность структуры оценивают по показателю водопрочности ( $K$ ), выраженному в процентах. 100% соответствуют наилучшей водопрочности. Водопрочность менее стойких агрегатов находится в интервале от 5 до 100%.

Показатель водопрочности рассчитывают по формуле:

$$K = \frac{(a \cdot \kappa_1) + (b \cdot \kappa_2) + \dots + (n \cdot \kappa_n)}{A} = \%,$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $n$  — количество агрегатов, расплывшихся в минуту;

$\kappa$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_n$  — поправочный коэффициент;

$A$  — общее количество агрегатов, взятых для анализа.

Пример расчета:

1. Если при определении водопрочности все агрегаты (50 штук) распались в первую минуту, то показатель водопрочности ( $K$ ) будет равен:

$$K = \frac{(a \cdot \kappa_1)}{A} = \frac{50 \cdot 5 \cdot 100}{50 \cdot 100} = 5\%.$$

2. Все агрегаты сохранились целыми в течение 10 мин:

$$K = \frac{50 \cdot 100 \cdot 100}{50 \cdot 100} = 100\%$$

Результаты анализа оформляют таблицей.

Таблица 17

Время отсчета в минутах	Поправочный коэффициент	Почва № 1		Почва № 2		Почва № 3	
		количество распавшихся агрегатов	показатель водопрочности	количество распавшихся агрегатов	показатель водопрочности	количество распавшихся агрегатов	показатель водопрочности
1	5	15		33		0	
2	15	1	$\frac{(75+15+0+140+0+330+520+150+255+1045)100}{50 \cdot 100} = 50,6\%$	10		2	
3	25	0		4		0	
4	35	4		2		0	
5	45	0		1		1	
6	55	6		0		0	
7	65	8		0		3	
8	75	2		0		0	
9	85	3		0		0	
10	95	11		0		4	
не распались агрегатов	100	0		0		40	$K = \frac{(30+45+195+380+4000) \cdot 100}{50 \cdot 100} = 93\%$

Примеры, приведенные в таблице, наглядно показывают, что величина показателя водопрочности зависит от времени распада агрегатов.

В почвах № 1 и № 2 все 50 агрегатов распались за 10 мин, но показатели водопрочности их различны, так как в первом случае разрушение их происходило постепенно, а во втором — агрегаты распались в первые же минуты воздействия на них воды.

Изменения в методе анализа и расчета результатов повысили точность работы. Применение «прижимного» кольца увеличило сходимость результатов контрольных определений. В ме-

тоде Андрианова расхождения объяснялись тем, что при смачивании водой бумага местами вспучивалась, что приводило к неодновременному смачиванию агрегатов водой.

**Метод Фадеева — Вильямса** относится к косвенным методам определения водопрочности макроструктуры почвы. Он основан на учете количества воды, прошедшей через колонку почвы в единицу времени.

Определение ведется в специальном приборе, который (рис. 22) состоит из двух цилиндрических сосудов — большого (1) и малого (2), соединенных между собой трубкой (5). В сосуд (1) помещается исследуемая почва, через сосуд (2) подается вода.

Сосуд (1) в верхней части имеет сливную трубку, отходящую от него под прямым углом. Диаметр этой трубки в два раза больше диаметра трубки (5). Сверху сосуд при работе остается открытым<sup>1</sup>.

Сосуд (2) снабжен изогнутой трубкой (3), один конец которой выходит через боковую стенку наружу. Трубка служит для сброса излишка воды и установления постоянного уровня ее в этом сосуде. Сосуд (2) приподнят над сосудом (1) с таким рас-

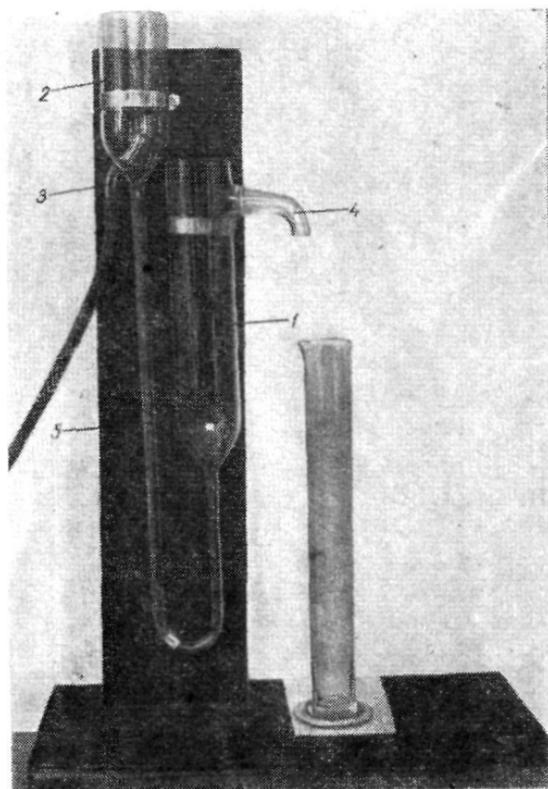


Рис. 22. Прибор Фадеева — Вильямса для определения водопрочности почвенных агрегатов:

1 — сосуд для образца почвы, 2 — сосуд для подачи воды, 3, 4 — сливные трубки, 5 — соединительная трубка

четом, чтобы расстояние между верхним концом его водоотводной трубки и поверхностью почвы в сосуде (1) соответствовало задаваемому напору воды при анализе (5, 10 см). Благодаря этому вода из сосуда (2) подается в сосуд (1) под постоянным давлением. В сосуд (2) вода поступает из водопроводного крана или бутылки. Прибор укреплен на деревянном штативе.

<sup>1</sup> В приборе Фадеева—Вильямса сосуд 1 закрывается сверху пробкой с водоотводной трубкой. При работе под пробкой образуется воздушный пузырь, который мешает нормальному току воды; кроме того, для герметичности пробки приходится заливать парафином, а это создает неудобство в работе.

Подготовка прибора к работе. На дно сосуда (1) кладут кусочек сетки с диаметром отверстий 0,25—0,5 мм. На сетку насыпают гравий (или битое стекло) слоем 4—5 см для создания равномерного тока воды, вновь накладывают кусок сетки и на него помещают исследуемый образец слоем в 10 см.

Для определения водопрочности берут структурную фракцию одного размера, полученную сухим просеиванием на ситах<sup>1</sup>. Сверху почвы накладывают еще одну сетку, насыпают слой гравия (или битое стекло) до водоотводной трубки и закрывают сеткой. Под водоотводную трубку сосуда (1) подставляют мерный цилиндр.

Определение водопрочности. Когда прибор заряжен, через него пропускают струю воды. Вода из сосуда 2 под определенным напором, создаваемым разностью высот сосудов, по трубке 5 поступает в сосуд (1); пройдя через слой гравия, почвы, вода изливается через водоотводную трубку и собирается в мерный цилиндр. Количество просочившейся воды учитывают за определенные интервалы времени: каждые 10 мин в течение первого часа, каждые 30 мин в течение второго и третьего часов и затем за каждый час до установления равномерной фильтрации.

По мере разрушения агрегатов количество воды, просачивающейся сквозь почву, будет уменьшаться. По изменению водопроницаемости судят о водопрочности почвенных агрегатов. Чем менее прочна структура, тем быстрее она будет расплываться и тем быстрее затухает кривая водопроницаемости.

Водопрочность выражается или количеством просочившейся воды за интервал времени или скоростью фильтрации:

$$V = \frac{Q}{t},$$

где  $V$  — скорость фильтрации в единице объема и за единицу времени ( $см^3/мин$ ,  $см^3/час$ );

$Q$  — количество просочившейся воды в единице объема;

$t$  — время просачивания в минутах или часах.

Результаты анализа оформляют в виде таблицы и графика

На графике по оси абсцисс откладывают время наблюдения, по оси ординат — количество воды в единицах объема ( $см^3$ ), или скорость фильтрации.

**Определение водопрочности структуры почвы в образцах ненарушенного сложения.** Н. И. Саввинов, а позже Н. Д. Пустовойтов, сохраняя принцип определения водопрочности структуры по учету фильтрации воды сквозь определенную толщу почвы (по методу Вильямса), предложили свой метод и прибор для определения водопрочности структуры почвы в образцах нена-

<sup>1</sup> В учебных целях целесообразно брать различные по размерам фракции одной почвы и одного размера, но разных почв. Затем в конце занятий ра-  
зобрать полученные результаты

рушенного сложения. На кафедре физики и мелиорации почв биолого-почвенного факультета МГУ конструкция прибора усовершенствована.

Прибор (рис. 23) состоит из специального штатива (1) с напорным стаканом (3) и цилиндром (2) для образца почвы. На литом утяжеленном штативе имеются два кольца (11), которые служат «гнездами» для цилиндра. Нижнее кольцо представляет собой сплошное дно с отводной трубкой посередине для подачи воды в цилиндр. Отводная трубка имеет трехходовой кран (5) и соединена с напорным стаканом. Последний путем поднятия и опускания устанавливают на заданной высоте, что обеспечивает определенный напор воды. Подачу воды в прибор можно осуществлять под напором 50, 100, 150 и 200 мм. Чаще всего применяют напор 50 мм. Напорный стакан имеет сливную трубку (4) для сброса излишков воды при установлении напора.

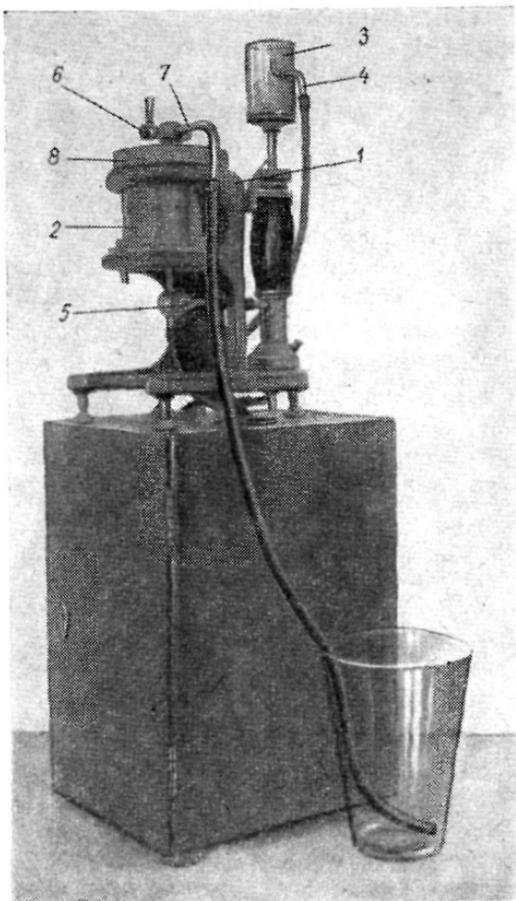


Рис 23. Прибор для определения водопропускности структуры почвы с ненарушенным сложением:

1 — литой металлический штатив, 2 — цилиндр для образца почвы, 3 — сосуд для подачи воды под определенным напором в цилиндр 2, 4, 7 — сливные трубки для удаления излишков воды, 5 — кран для впуска воды в сосуд, 6 — кран для спуска воды из почвенного цилиндра, 8 — крышка

В кольцо вделано второе кольцо с винтовой нарезкой, на которое надевается массивная крышка (8). С внутренней стороны крышки имеется резиновая прокладка. Последняя обеспечивает герметичность прибора, что необходимо для работы. Крышка снабжена водоотводной трубкой (7) с трехходовым краном (6). Цилиндр для образца (2) изготовляют из нержавеющей стали или латуни. Высота цилиндра 85 мм, диаметр 80 мм, толщина стенки 1—1,5 мм. Закрывается хорошо пригнанными крышками. К прибору следует иметь несколько цилиндров. Для удобства транспортировки их укладывают в ящик с гнездами.

Взятие образца почвы для анализа. Образцы

почвы для анализа могут быть взяты с любой глубины. Для этого подготавливают площадку. С цилиндра снимают крышки и слегка смазывают стенки вазелином. Погружение цилиндров в почву производят с помощью направителя (подобно взятию образца для определения удельного веса почвы по Н. А. Качинскому); в рыхлую почву цилиндр можно погружать надавливанием рукой на его крышку. Образец очень плотной почвы предварительно увлажняют, вырезают ножом монолитик и постепенно надвигают на него цилиндр. Заполнив цилиндр, вынимают его вместе с почвой, удаляют ее излишки и закрывают крышками. Для сохранения в образце естественной влажности (в случаях продолжительного хранения) в лаборатории цилиндр покрывают тонким слоем парафина (для этого его тщательно закрытым быстро перекачивают в ванне с расплавленным парафином). В таком состоянии образцы могут длительное время сохранять естественную влажность. При транспортировке образцов на далекое расстояние их необходимо упаковывать в небольшие ящики, перекладывая бумагой или сеном. Такая упаковка, помимо сохранения целостности образца, предохранит от резких колебаний температуры, что могло бы привести в случаях высокой влажности почв к выпотеванию воды на стенках цилиндра.

Ход определения водопрочности структуры. Перед анализом с цилиндра снимают крышки. На дно гнезда штатива накладывают сетку с диаметром отверстий 0,5—0,25 мм. Цилиндр устанавливают в «гнездо», сверху накладывают также сетку и закрывают крышкой (8), накрепко ее завинчивая. Резиновые прокладки на нижней и верхней крышках предохраняют от бокового оттока воды.

Напорный стакан устанавливают на заданный напор и соединяют с источником воды (бутыль, кран водопроводный). Открывают верхний и нижний краны прибора. Вода поступает в цилиндр через нижний кран, проходит колонку почвы и поступает через верхнюю отводную трубку в мерный цилиндр. Записывают время появления первой капли и с этого момента ведут учет количества просочившейся воды за каждые 10 мин (6 отсчетов), потом за каждые 30 мин (4 отсчета) и, наконец, за каждый час до установления постоянной скорости. Первые отсчеты можно производить через более короткие промежутки времени — 5 мин. Периодически замеряют температуру воды, поступающей в цилиндр. Результаты наблюдений с поправкой на температуру выражают в мм/мин, мм/час, мм/сутки, см/сек. Полученные данные оформляют в виде таблиц и графиков. На графике по оси ординат откладывают коэффициент фильтрации, по оси абсцисс — время в секундах, минутах, часах или сутках.

С помощью описанного прибора можно также изучать водопрочность отдельных структурных фракций почвы.

## Определение механической прочности (связности) почвенных агрегатов

Механическую прочность или связность агрегата можно измерить и выразить в величинах нагрузки, которая потребуется для его разрушения. Для определения связности агрегата удобными являются метод и прибор, предложенные проф. Виленским.

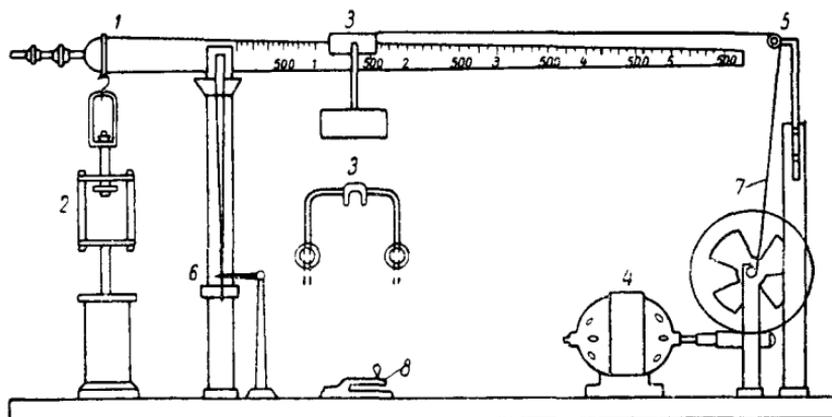


Рис. 24. Прибор Виленского для определения механической прочности (связности) почвенных агрегатов:

1 — короткое плечо, 2 — приспособление из серег, 3 — ползунок, 4 — электромотор, 5 — блок, 6 — стрелка весов, 7 — тросик из шелковой нитки, 8 — ключ

Описание прибора (рис. 24). Прибор представляет собой неравноплечие весы. На короткое плечо (1) надето приспособление из серег (2). Нижняя серьга может подниматься или опускаться с помощью винта. Верхняя серьга подвижно подвешена к рычагу весов. На длинном плече помещается ползунок (3), который посредством тросика — шелковой нитки (7), переброшенного через блок (5), соединен с моторчиком (4).

Ход работы. Для испытания берут 50 агрегатов одного размера. Испытуемый агрегат помещают на пластинку верхней серьги. Нижнюю серьгу опускают до соприкосновения с агрегатом. Включают моторчик, и трос натягивает ползунок. В момент разрушения агрегата стрелка весов (6) отклоняется, нарушается контакт. Моторчик останавливается, и ползунок автоматически регистрирует нагрузку, нужную для разрушения агрегата. Для 50 агрегатов рассчитывают среднюю величину механической прочности в граммах.

На приборе можно определить сопротивление агрегата раздавливанию и расклиниванию. Для расклинивания — на пластинке серег закрепляют равностороннюю стальную призму.

В любой лаборатории для определения механической прочности можно использовать техно-химические весы на 1 кг. Для

этого одну чашку весов заменяют равным ей по весу и диаметру диском (из пластмассы или алюминия), к платформе весов над диском прикреплена металлическая скоба. Сверху в центре скобы и над центром нижнего диска пропущен винт с нарезкой, на нижнем конце которого закреплен диск диаметром 2—3 см. Поверхности нижнего и верхнего диска должны быть строго параллельны. Агрегат помещают на нижний диск. Верхний диск с помощью винта опускают до соприкосновения с агрегатом. Открывают весы и на противоположную чашку их ставят гири или насыпают песок до разрушения агрегата.

### Определение порозности агрегатов

Порозность агрегатов важна для агрономической характеристики структурных элементов почвы. Ее можно охарактеризовать с количественной стороны (метод парафинирования) и с качественно-количественной (метод микроскопирования).

**Метод парафинирования.** Метод фиксирования почвенных образцов парафином известен давно. Его применяли в своих исследованиях Панков, Пигулевский, Мищенко, Рыжов и др.

Но разработанная ими методика имела существенный недостаток. Фиксирование образцов проводилось в парафине густой консистенции. В результате чего на поверхности образца при застывании образовывалась толстая пленка из парафина, которую необходимо было учитывать при расчете объема агрегата.

В лабораториях физики почв МГУ и Почвенного ин-та АН СССР проведены работы по усовершенствованию техники парафинирования и разработке методики анализа. Предлагается использовать перегретый парафин, который, благодаря жидкому состоянию, может, вытесняя воздух, проникать внутрь агрегата и при охлаждении не давать пленки на поверхности образца.

Рядом исследователей (А. Ф. Тюлин, С. Н. Рыжов, М. Польский) установлена зависимость порозности агрегата от его размера: с уменьшением размера агрегата уменьшается его порозность. Соответственно этому рекомендуется определять порозность крупных и мелких агрегатов. В настоящее время используют методику определения порозности агрегата, детально разработанную М. Н. Польским и Н. А. Качинским.

**Фиксация крупных агрегатов.** Из воздушно-сухой почвы отбирают 5 агрегатов диаметром около 10 мм. Одновременно берут навеску почвы для определения влажности. Каждый агрегат обвязывают крест-накрест тонкой медной проволокой (0,1 мм) определенного веса (нарезают одинаковые куски проволоки, взвешивают все вместе, а затем рассчитывают средний вес каждой). На другом конце проволоки делают петлю.

Обязанные проволокой образцы взвешивают на аналитических весах с точностью до  $0,0001 \text{ г}$  ( $P_1$ ). Взвешивают и хранят незапарафинированные и запарафинированные агрегаты обязательно в подвешенном положении под своими номерами (при взвешивании номера снимают).

Вычитая вес проволоки и учитывая процент влажности, находят вес абсолютно сухого агрегата ( $P$ ).

Образцы гумусных почв фиксируются в четыре приема:

1) Подвешенные за проволочку на стеклянной или металлической перекладине образцы погружают в стакан (или чашку) с расплавленным парафином, температура которого  $90\text{--}100^\circ\text{C}$ , и выдерживают в нем до прекращения выделения пузырьков воздуха (1—3 час).

2) Агрегаты переносят во второй стакан с парафином, нагретым до  $150\text{--}170^\circ\text{C}$ , на несколько минут, для удаления остатков воздуха. Благодаря жидкой консистенции парафин входит в тонкие поры агрегата.

3) Агрегаты переносят в третий стакан с парафином, остуженным до  $50\text{--}60^\circ$ . В нем агрегаты охлаждаются, парафин в них сжимается и в поры втягивается дополнительное количество парафина. Этим достигается более совершенная закупорка пор. Через 15—20 мин агрегаты извлекают из парафина и охлаждают на воздухе.

4) Агрегаты ополаскивают во втором стакане (в парафине при температуре  $150\text{--}170^\circ$ ) для

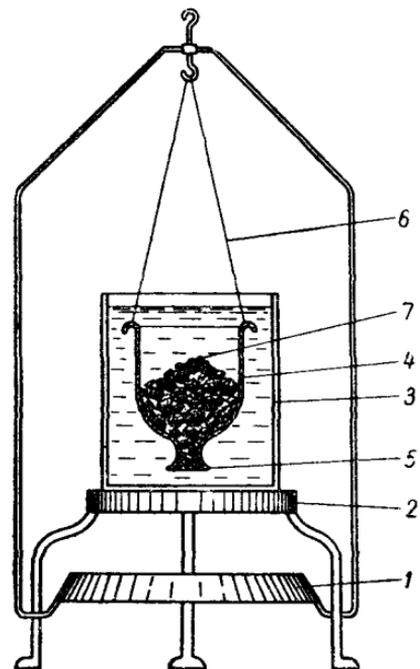


Рис 25 Определение порозности агрегатов гидростатическим взвешиванием:

1 — чашка весов, 2 — треногий столик, 3 — стакан со спиртом, 4 — стеклянный стаканчик для взвешивания агрегатов, 5 — дно стаканчика из шелка или сетки, 6 — тонкая металлическая проволока (0,1 мм) 7 — агрегаты

удаления с поверхности агрегата пленки парафина. При этом каждый агрегат отдельно опускают в горячий парафин и быстро вынимают. Каплю парафина, образовавшуюся снизу агрегата, снимают фильтровальной бумагой. После этого агрегаты должны иметь вид свежей (слегка увлажненной) почвы.

Связные и безгумусные образцы, в которых не ожидается потери от перегревания, можно начинать фиксировать сразу в перегретом парафине, т. е. при температуре  $150\text{--}170^\circ$ . Дальнейшая последовательность та же, что и для образцов гумусных.

Зафиксированные образцы взвешивают сначала на воздухе ( $P_2$ ), а затем в этиловом спирте ( $P_3$ ).

Взвешивание в спирте производят следующим образом: над чашкой весов устанавливают специальный столик так, чтобы он не касался чашки. На столик ставят стакан со спиртом, в который погружают взвешиваемый агрегат, подвешенный на крючке чашки весов (рис. 25).

Спирт применяют потому, что он хорошо смачивает парафин, почти не растворяя его. Вода не смачивает парафина, поэтому на поверхности агрегата остаются пузырьки воздуха, искажающие результаты взвешивания.

Определив спиртомером концентрацию (крепость) спирта, по таблице (справочник физических констант) находят его плотность ( $D_1$ ).

Расчеты. Потеря в весе агрегата при взвешивании на воздухе и в спирте ( $P_2 - P_3$ ) равна весу спирта в объеме агрегата ( $V$ ). Рассчитывают объем спирта (объем агрегата).

$$V = \frac{P_2 - P_3}{D_1},$$

затем объемный вес агрегата:

$$d_v = \frac{P}{V},$$

где  $P$  — вес абсолютно сухого агрегата;

$V$  — объем агрегата.

Порозность агрегата ( $P_a$ ) вычисляется по формуле:

$$P_a = \frac{d - d_v}{d} \cdot 100 \quad (17)$$

или

$$P_a = \left(1 - \frac{P}{V \cdot d}\right) \cdot 100, \quad (18)$$

где  $d_v$  — объемный вес агрегата;

$d$  — удельный вес твердой фазы почвы;

$P$  — вес абсолютно сухого агрегата;

$V$  — объем агрегата.

Фиксация мелких агрегатов (от 5 до 0,5 мм). Из отсеянной фракции отбирают 10—20 агрегатов, все вместе взвешивают и раскладывают на «блюдце» из фильтровальной бумаги, в дне которого проделаны (иголкой) небольшие отверстия.

«Блюдце» с агрегатами устанавливают на металлическую сетку и опускают в широкую чашку с расплавленным парафином, нагретым примерно до 100°. Сначала сетка лишь касается поверхности парафина и агрегаты насыщаются капиллярно; после удаления большей части воздуха из пор агрегатов сетку погружают в парафин. По прекращении выделения пузырьков

Форма записи при определении порозности агрегата

Название почвы	Горизонт, глубина в см	Номер агрегата	Вес воздушно-сухого агрегата	Гигр. влажность в % на абс. сухую навеску	Вес абсолютно сухого агрегата $P$	Вес парафинированного агрегата	Потеря в весе агрегата $P_2 - P_3$	Крепость спирта	Плотность спирта $D_1$	Объем агрегата $v = \frac{P - P_3}{D_1}$	Объемный вес агрегата $d_v = \frac{P}{v}$	Порозность агрегата $P_a = \frac{d - d_v}{d} \cdot 100$
						на воздухе $P_2$						
						в спирте $P_3$						

воздуха парафин охлаждают до 70—80° и «блюдец» с агрегатами извлекают из парафина.

Остывшие агрегаты отделяют от дна «блюдца» вместе с парафиновой корочкой и переносят на теплую этернитовую плитку, покрытую фильтровальной бумагой. Здесь агрегатике осторожно перекачивают по бумаге до удаления с их поверхности парафиновой пленки. Для перекачивания удобно использовать стеклянную палочку с резиновым наконечником, заостренным наподобие пера.

Правильно зафиксированные агрегаты не должны иметь незаполненных пор и парафиновой пленки на поверхности. Запарафинированные агрегаты взвешивают сначала на воздухе, а затем в этиловом спирте. Взвешивание агрегатов в спирте производят в специальном стаканчике. Стаканчик имеет суженное дно, обтянутое батистом или тонкой металлической сеткой для того, чтобы спирт свободно входил в стакан. В верхней части стаканчика имеются крючечки, за которые на проволочке его подвешивают над чашкой весов. Сначала взвешивают в спирте пустой стаканчик, а затем с агрегатами. Стаканчик с агрегатами полностью погружают в стакан со спиртом, установленный на столике, как было описано выше и видно на рис. 25. Он не должен касаться стенок и дна большого стакана и выходить за пределы поверхности спирта при поднятии.

Порядок расчета порозности мелких агрегатов такой же, как для агрегатов крупных.

Порозность агрегата свыше 50% считается наилучшей, 50—45 хорошей, 45—40 — удовлетворительной и меньше 40% — неудовлетворительной.

Агрегаты черноземной почвы имеют наилучшую и хорошую порозность, даже в иллювиальном горизонте она не бывает ниже 40%. В подзолистой почве порозность в агрегатах горизонта А не поднимается выше удовлетворительной. В иллювиальном

горизонте — неудовлетворительная. Агрегаты солонца имеют порозность неудовлетворительную.

**Метод микроскопирования.** Данный прием в исследовании почвенного агрегата позволяет, помимо прямого подсчета пор, дать качественную оценку порозности (внутри агрегата). Для этой цели из почвенных агрегатов готовят тонкие шлифы. Под микроскопом с помощью микрометра в них можно определить размеры пор и подсчитать общую площадь порового пространства, зарисовкой или фотографированием зафиксировать их конфигурацию. Шлифы можно использовать также для определения минералогического состава образца.

На рис. 26 приведена зарисовка шлифа почвенного агрегата горизонта А дерново-подзолистой почвы под микроскопом.

**Изготовление шлифа.** Прежде чем приступить к подготовке шлифа, агрегат закрепляют (фиксируют), для этого его проваривают в фиксаторе. В качестве фиксирующих веществ применяют канифоль, бакелитовый лак, некоторые пластмассы. Иногда, чтобы не изменить нагреванием исследуемый материал, применяют холодные цементы: гипс, зубной цемент. Для наклейки зафиксированного агрегата на стекло используют бальзамы — пихтовый и канадский.

Шлифы можно готовить из крупных и мелких агрегатов. В последнем случае фиксируют вместе несколько агрегатов. При работе с расплавленными фиксаторами следует строго соблюдать осторожность: работать в вытяжном шкафу и иметь вблизи противопожарные средства.

**Изготовление шлифа из крупных агрегатов.** Агрегаты берут размером 10—12 мм. Чтобы сохранить целостность агрегатов, особенно в случае рыхлого сложения, перед проваркой их, по отдельности или все вместе, обвязывают марлей (батистом).

Чаще всего в качестве фиксатора применяют канифоль. Чтобы получить жидкую консистенцию, ее растворяют в органическом растворителе: ксилоле (лучше), бензоле, толуоле. Для этого твердую канифоль мелко измельчают, заливают растворителем и через некоторое время осторожно подогревают на малом огне до полного растворения.

Погружение агрегатов в расплавленный фиксатор следует производить постепенно, давая возможность фиксатору запол-

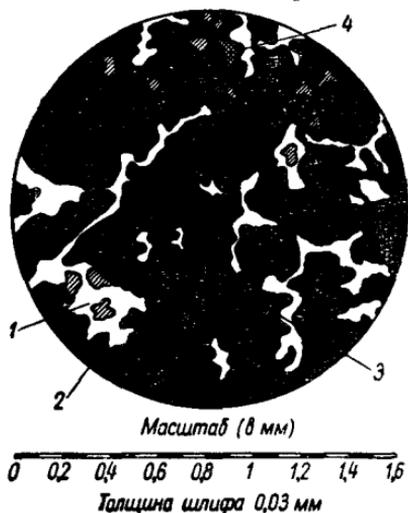


Рис. 26. Шлиф почвенного агрегата (дерново-подзолистая почва, горизонт А)

1 — поры, 2 — твердая фаза почвы, 3, 4 — минералы

нить капилляры. После этого образцы полностью погружают в раствор и проваривают в нем до полного прекращения выделения пузырьков воздуха. Время проваривания определяется консистенцией фиксатора и порозностью агрегата. Для проваривания тонкопористых агрегатов требуется фиксатор жидкой консистенции. Проваренные образцы вынимают из фиксатора, охлаждают, отделяют от марли и шлифуют на шлифовальном станке при скорости вращения диска 500—600 об/мин. Первое шлифование производят грубым корундовым порошком (№ 170—180). Порошок подают на диск разведенным водой или глицерином до жидкой кашицы. Сначала образец готовят для наклейки на стекло, поэтому шлифуют пока одной стороной до получения ровной поверхности. После этого отшлифованную поверхность отмывают щеткой в глицерине, насухо протирают и снова проваривают в фиксаторе в сушильном шкафу или на этернитовой плитке. Вновь шлифуют на шлифовальном станке, но уже с тонким порошком (28-минутником).

Эти операции повторяют до тех пор, пока агрегат полностью зацементируется.

После цементации отшлифованную поверхность агрегата выравнивают на толстом матовом (отшлифованном) стекле еще более тонким порошком корунда (14—10-минутником), чисто промывают и просушивают.

Подготовленный таким образом агрегат наклеивают пихтовым или канадским бальзамом отшлифованной стороной на предметное стекло. Чистое и сухое предметное стекло кладут на подогретый металлический столик, намазывают твердым пихтовым или канадским бальзамом и подогретым накладывают на отшлифованную поверхность агрегата. Тщательно притирают, чтобы удалить пузырьки воздуха. После закрепления агрегата на стекле шлифуют другую его сторону на шлифовальном станке сначала грубым корундовым порошком (№ 170—180), затем более тонким — 28-минутником и, наконец, на стекле порошком 14—10-минутником доводят до толщины 0,02—0,03 мм.

Контроль за толщиной шлифа ведут с помощью поляризационного микроскопа по окраске кварца. При толщине шлифа 0,02—0,03 мм интерференционная окраска кварца при скрещенных николях бледно-серая.

Шлиф покрывают вышеописанным способом чистым и сухим покровным стеклом. Двигая и слегка прижимая стекло к шлифу, удаляют пузырьки воздуха и излишки бальзама. После затвердения эти излишки снимают подогретой бритвой. Шлиф промывают спиртом или ксилолом со щеткой. На этом приготовление шлифа заканчивают и его используют для микроскопического изучения строения почвенного агрегата.

*Изготовление шлифа из мелких агрегатов.* Берут отрезки стеклянной трубки диаметром и высотой 10 мм. Помещают на подогретый металлический столик. После нагревания трубо-

чек в них наливают разогретый фиксатор жидкой консистенции и опускают несколько мелких агрегатиков, распределяя их по всему диаметру трубки. Нагрев столика прекращают. Трубочки с содержимым охлаждают и после полного затвердения фиксатора их легко отбивают от столика. Получают монолитик, заключенный в стеклянную оправу. Сначала шлифуют и выравнивают поверхность одного конца монолитика до снятия части поверхности агрегатов. После наклейки на стекло шлифуют другой конец — до получения шлифа толщиной 0,02—0,03 мм.

Приемы шлифования, наклейки и покрытия шлифа такие же, как при изготовлении шлифов из крупных агрегатов.

Техника подсчета площади порового пространства в шлифах под микроскопом. Микроскопическим методом возможен учет видимой порозности, т. е. таких пор, которые значительно превосходят толщину шлифа или расположены нормально к его поверхности.

Существует несколько методов подсчета площадей: планиметрический, линейный, точечный, суммарного фотоэффекта. Для дробного учета пор в шлифах наиболее удобен планиметрический метод, который может быть применен в различных вариантах (клеточный метод, метод зарисовки, метод увеличенных фотографий и метод проекции шлифа).

*Клеточный метод.* С помощью квадратно-сетчатого окуляр-микрометра подсчитывают количество клеток (квадратов), накладываемых на просматриваемый объект. Поры просматривают при малом увеличении (не более 120). Сначала подсчитывают общую площадь шлифа, а затем площадь пор.

Принимая общую площадь шлифа за 100%, рассчитывают площадь пор в процентах. Одновременно отмечают видимую порозность (крупные поры). Вычитая из общей порозности агрегата площадь крупных пор, рассчитывают площадь остальных пор.

*Метод зарисовки* можно использовать для определения размера пор. С помощью рисовального аппарата РА-1 при малом увеличении микроскопа воспроизводят строение шлифа на рисунке. Планиметром измеряют площадь пор на рисунке и, зная степень увеличения, рассчитывают размер пор в агрегате.

*Метод фотографирования в сочетании с проекционным методом* является одним из наилучших приемов подсчета пор. Он заключается в следующем: при помощи микрофотографической камеры фотографируют несколько участков шлифа на соответствующее количество кадров киноплёнки. После проявления пленки, каждый кадр проектируют на квадратно-клеточный экран. Подсчитывают общую площадь порового пространства шлифа и определяют размеры и характер пор.

**Коллоидно-химический и микроскопический анализ почвенных агрегатов.** Для выяснения природы почвенных агрегатов, характера связи механических элементов в них, группой авторов —

И. Н. Антипов-Каратаев, В. В. Келлерман и Д. В. Хан — предложен коллоидно-химический метод анализа, или метод «анатомирования» почвенного агрегата.

Он основан на последовательном нарушении связей между механическими элементами, образующими агрегат, воздействуя на него химическими реагентами с постепенно увеличивающейся силой воздействия. Обработку агрегата проводят в 4 стадии. В качестве реагентов применяют буферный раствор 0,1 н. NaOH + 0,1 н. Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, реактив Тамма и гипробромит натрия. Параллельно с обработкой на разных стадиях ведут микроскопическое изучение с зарисовкой и микрофотографированием исследуемых агрегатов.

**Ход анализа.** Берут образец почвы весом 200—300 г и мокрым просеиванием разделяют на фракции: > 5, 5—3, 3—2, 2—1, 1—0,5, 0,5—0,25 и < 0,25 мм. Фракции собирают в фарфоровые чашки и высушивают в сушильном шкафу при температуре не выше 40°C. После высушивания каждую фракцию еще раз просеивают на ситах соответствующего размера. Из приготовленной фракции обычным путем берут среднюю пробу, помещают на часовое стекло, просматривают под поляризационным микроскопом при увеличении в 30—50 раз и описывают внешние признаки агрегата: форму, поверхность, характер граней, окраску, пористость и трещиноватость, степень покрытости минеральными зернами.

Из средней пробы отбирают 50—100 агрегатов. В учебных целях можно ограничиться предварительным отбором 50 агрегатов и окончательным — для обработки — 10—20, в научных целях рекомендуется брать предварительно 100 и окончательно 50 агрегатов (наиболее типичных для данной фракции) и вторично испытать на водоустойчивость. Для этого отобранные агрегаты укладывают отдельно на стекло, покрытое фильтровальной бумагой, концы которой опущены в воду. Вода постепенно смачивает агрегат. После смачивания подачу воды прекращают. Агрегаты подсушивают на воздухе и вновь просматривают под микроскопом. Для коллоиднохимического анализа отбирают 10—20 (до 50) агрегатов, сохранившихся целыми и после второго испытания на водоустойчивость. Каждый агрегат отдельно помещают на часовое стекло и подвергают обработке.

*Первую обработку* делают буферным раствором 0,1 н. NaOH + 0,1 н. Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (соотношение реагентов 1 : 4). При этой обработке с агрегата удаляется свободное и рыхло связанное органическое вещество.

На часовое стекло рядом с агрегатом пипеткой опускают 2—3 капли раствора. Количество капель зависит от размера агрегата. Подача реактива малыми дозами-каплями предохраняет агрегат от механического разрушения.

Взаимодействие раствора с агрегатом продолжается 2—3 час. Затем раствор удаляют осторожным отсасыванием его пипеткой

с хорошо оплавленным капилляром. Конец пипетки плотно прижимают к часовому стеклу, чтобы при отсасывании не удалить вместе с раствором и микроагрегаты или механические элементы, отделившиеся от агрегата.

После удаления первой порции раствора подают новую порцию его и так до тех пор, пока при взаимодействии реактива с агрегатом окраска раствора станет бесцветной. На этом обработку заканчивают — все свободные и рыхло связанные гумусовые вещества переводят в раствор и удаляют. Число обработок может колебаться от 12 до 18 для фракций  $> 5$  и  $3-2$  мм и от 6 до 7 — для фракций  $2-1$  и  $< 0,25$  мм.

Остатки раствора смывают водой. Для этого на стекло капают несколько капель воды, которую затем снимают фильтровальной бумагой. Отмывку водой продолжают до нейтральной реакции. После удаления последней порции воды агрегат подсушивают при комнатной температуре. Из всех обработанных агрегатов отбирают несколько для изучения под микроскопом, остальные подвергают дальнейшей обработке.

Микроскопическое изучение агрегата рекомендуется проводить в четыре приема:

1. Описывают общий вид поверхности агрегата: его окраску, характер распада (для фракций  $> 3$  мм при увеличении в 30 и при увеличении в 50 раз для фракций  $< 3$  мм).

2. При увеличении 540 (в сухом виде) описывают поверхность микроагрегатов или тонких срезов с их поверхности: равномерность окраски, взаимоотношение между минеральной частью почвы, степень покрытости минеральных зерен «плазмой».

3. Изучают агрегат аналогично предыдущему, только в иммерсионной жидкости (касторовое масло).

4. Описывают при увеличении 1200 в иммерсионной жидкости поверхности минеральных зерен, плазмы и их взаимоотношения.

При микроскопировании делают схематические зарисовки.

*Вторая обработка* заключается в переводе в растворимое состояние и удаление подвижных полуторных окислов действием реактива Тамма при рН, равном 3,20—3,27.

Раствор готовят следующим образом: на 4 л воды берут 25,22 г  $(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и 49,62 г  $(\text{NH}_4\text{COO})_2$ .

Техника обработки та же, что и в первом случае. Количество обработок может достигать 20—30. Так как раствор остается бесцветным, конец обработки определяют по качественной реакции на Fe. После полного удаления Fe и Al агрегаты промывают водой до нейтральной реакции и высушивают. Несколько агрегатов отбирают для изучения под микроскопом, остальные подвергают дальнейшей обработке.

*Третья обработка* — вторичное воздействие буферного раствора. В раствор переводят органическое вещество, освобожденное после удаления подвижных полуторных окислов.

Выделение органического вещества при этой обработке про-

исходит быстрее, и интенсивность окраски раствора с каждой новой порцией его резко падает. Количество обработок может колебаться от 5 до 15 в зависимости от характера исследуемой почвы.

По получении бесцветного раствора агрегат промывают водой, высушивают и изучают под микроскопом, как в предыдущих случаях.

*Четвертая обработка* — медленное окисление гипробромитом натрия нерастворимой фракции органического вещества («гумина»), прочно связанного с минеральной частью почвы и удерживающего первичные элементы в микроагрегатах. Приготовление раствора гипробромита натрия: 2,5 г брома растворяют в 100 мл 1 н. NaOH, взбалтывают и оставляют стоять на 2 час; затем добавляют еще 100 мл 1 н. NaOH и оставляют на ночь. Утром раствор используют. На часовое стекло с агрегатом капают 1—3 капли раствора, а затем раствор удаляют. Удалять раствор нужно очень осторожно, так как почва сильно диспергирована. Забрав раствор пипеткой, дают ему некоторое время отстояться и с конца пипетки спускают осадок обратно на стекло, а прозрачную часть раствора удаляют.

---

### ГЛАВА III

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ВЕСА И ПОРОЗНОСТИ ПОЧВЫ

Удельным весом почвы называют отношение ее веса к весу равного объема воды при 4°C.

Почва представляет собой сложное тело, состоящее в основном из трех фаз: твердой, жидкой и газообразной. В зависимости от того, в каком сочетании определяют удельный вес, различают три понятия удельного веса почвы:

1. Удельный вес твердой фазы почвы (твердая фаза) —  $d$ .
2. Удельный вес скелета почвы, или объемный вес (твердая и газообразная фазы) —  $d_v$ .
3. Удельный, или объемный, вес почвы в естественном ее состоянии (твердая, жидкая и газообразная фазы) —  $d_{v1}$ .

### УДЕЛЬНЫЙ ВЕС ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПОЧВЫ

Под удельным весом твердой фазы почвы понимают отношение веса твердой фазы почвы (почвы без скважин) определенного объема к весу воды того же объема при 4°C.

Наглядно это можно представить следующим образом: если взять кусочек высушенной почвы и спрессовать его таким образом, чтобы не было скважин, то отношение веса взятой почвы к весу воды того же объема и есть удельный вес твердой фазы почвы.

Величина удельного веса твердой фазы почвы зависит от ее химического и минералогического состава и определяется средней величиной удельных весов веществ, составляющих данную почву, и их относительным содержанием.

В состав минеральной части почвы, в качестве основных минералов, входят кварц, полевые шпаты, глинные минералы, име-

ющие удельный вес в пределах 2,40—2,80 (см. табл. 19). Реже встречаются железосодержащие минералы с удельным весом до 4.

Таблица 19

Состав и удельный вес некоторых минералов

Название минерала	Состав	Удельный вес
Кварц . . . . .	$\text{SiO}_2$	2,65—2,66
Ортоклаз . . . . .	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	2,50—2,62
Плагиоклазы:		
альбит . . . . .	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	2,62—2,65
анортит . . . . .	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	2,74—2,76
микроклин . . . . .	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	2,54—2,57
Каолинит . . . . .	$\text{Al}_2(\text{OH})_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$	2,60—2,63
Мусковит . . . . .	$\text{KAl}_2(\text{OH}, \text{Fe})_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$	2,76—3,00
Биотит . . . . .	$\text{CaCO}_3$	2,70—3,10
Роговые обманки . . . . .	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3,00—3,50
Авгит . . . . .	$\text{K}(\text{Fe}, \text{Mg})_3(\text{OH}, \text{Fe})_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$	3,30—3,60
Лимонит . . . . .	состав изменчив	3,40—4,00
Кальцит . . . . .	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Fe}^{++})[(\text{Al}, \text{Si})_2\text{O}_6]$	2,60—2,80
Гипс . . . . .	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2,31—2,33
Монтмориллонит . . . . .	$\text{Al}_2(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$	около 2,00
Нонтронит . . . . .	$\text{Fe}_2(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2,27—2,29

Удельный вес гумуса — 1,20—1,40. Поэтому в почвах мало-гумусных и в нижних горизонтах гумусных почв удельный вес колеблется в пределах 2,60—2,80 и до 3,00 — в красноземных почвах. Чем почва или горизонт богаче гумусом, тем меньше удельный вес твердой фазы (2,40—2,50).

Таким образом, удельный вес твердой фазы косвенно характеризует химический состав почвы

Знание удельного веса твердой фазы почвы необходимо для расчета порозности почвы, а также при производстве механического анализа — для расчета скорости падения частиц по формуле Стокса.

### Определение удельного веса твердой фазы почвы

Удельный вес твердой фазы почвы чаще всего определяется пикнометрически. Принцип пикнометрического метода заключается в определении объема воды или инертной жидкости, соответствующего объему почвы, взятой для анализа.

Пикнометр — мерный сосуд, позволяющий учитывать объем жидкости с большой точностью. Пикнометры могут быть различной величины и формы. Примером грубого пикнометра может служить простая мерная колба.

На рис. 27 представлены наиболее распространенные в практике типы пикнометров. Обычно используют пикнометры объемом 100 и 50 см<sup>3</sup>, в геологической практике при определении удельного веса редких минералов используют микропикнометры.

Наиболее удобным мы считаем пикнометр, представленный на рис. 27, а. Объем пикнометра равен 100 см<sup>3</sup> при высоте 8 см и диаметре — 4 см. Хорошо притертая массивная пробка имеет тонко-капиллярное отверстие, через которое удаляется избыток жидкости при наполнении пикнометра. Этим обеспечивается точность в работе.

При определении удельного веса твердой фазы незасоленных почв используют дистиллированную воду без СО<sub>2</sub>.

Удельный вес твердой фазы засоленных почв, содержащих легко растворимых солей свыше 0,5%, определяют в неполярных жидкостях (бензол, бензин, толуол, ксилол, керосин).

Ряд исследователей (Цункер, А. В. Думанский, М. В. Чапек и др.) считают, что удельный вес твердой фазы почв вообще следует определять не в воде, а в неполярных жидкостях, так как с водой получают завышенные результаты вследствие сжатия системы почва-вода. Жидкости адсорбируются гидрофильными порошками (к которым относится и почва) прямо пропорционально их диэлектрической постоянной. Вода, диэлектрическая постоянная которой равна 81, сильнее адсорбируется почвой, чем неполярные жидкости, имеющие диэлектрическую постоянную, равную 2. Адсорбируясь, вода сжимает почвенную частицу, следовательно, уплотняет ее, в результате уменьшается объем, занимаемый почвой.

Исследования, проведенные в лаборатории кафедры физики и мелиорации почв МГУ, по сравнению влияния различных жидкостей на величину удельного веса твердой фазы почвы, также показали завышение результатов при применении воды. Влияние применяемых жидкостей сказывается на почвах тяжелого механического состава и гумусных и не сказывается на песчаных.

Несмотря на это, использование неполярных жидкостей для

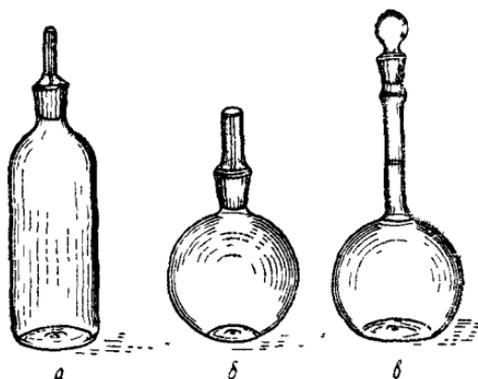


Рис. 27. Пикнометры для определения удельного веса твердой фазы почвы

определения удельного веса твердой фазы вообще не рекомендуется, так как это будет отступлением от естественных условий. Их применяют только для засоленных почв, чтобы избежать растворения легко растворимых солей.

Приводимая ниже методика определения удельного веса твердой фазы почвы, разработанная проф. Н. А. Качинским, наиболее часто применяется в практике.

Анализ состоит из следующих операций: 1) определение объема пикнометра, 2) подготовка почвы к анализу и 3) определение удельного веса твердой фазы.

**Определение объема пикнометра.** Пикнометр чисто моют, ополаскивают дистиллированной водой и высушивают в сушильном шкафу при температуре не выше 60°C. Можно также ополоснуть его этиловым спиртом или эфиром и просушить с помощью воздуходувки или каучуковой груши. Сухой пикнометр вместе с пробкой взвешивают с точностью до 0,001 г. Вес его записывают. При определении объема пикнометра, а также при определении удельного веса незасоленной почвы используют дистиллированную воду, из которой удален воздух. Воду готовят заранее. В колбе емкостью 2—3 л дистиллированную воду кипятят в течение 2 час. В горячем состоянии ее переливают в прогретые склянки (доверху) и закрывают пробками с хлоркальцевыми трубками, наполненными натронной известью. Хранить прокипяченную воду удобнее в склянках большого объема (2—3 л), а при работе использовать склянки меньшего объема (500 см<sup>3</sup>). Этой водой наполняют и капельницу.

Пикнометр следует держать в кристаллизаторе или в деревянном лотке с гнездами и меньше касаться его руками. Если необходимо взять пикнометр, нужно завернуть его в полотенце и брать двумя пальцами за горло.

Для определения объема пикнометр наполняют прокипяченной дистиллированной водой почти доверху, т. е. так, чтобы при закрытии пробкой из капилляра вышло 1—2 капли воды, закрывают пикнометр пробкой, которая тщательно притирается. Под пробкой и в капилляре не должно быть пузырьков воздуха. Записывают температуру воды.

Пикнометр тщательно вытирают сухим полотенцем, ставят в сухой кристаллизатор и переносят в весовую комнату. Через 20—25 мин взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,001 г. Объем пикнометра рассчитывают по формуле:

$$V = \frac{a_1 - a}{D},$$

где  $V$  — объем пикнометра в см<sup>3</sup>;

$a_1$  — вес пикнометра с водой;

$a$  — вес сухого пикнометра;

$D$  — плотность воды при данной температуре.

Наполнение пикнометра и расчет объема необходимо произ-

водить 2—3 раза и за окончательный результат принимать среднее из всех определений.

После определения объема воду из пикнометра выливают, его высушивают, как было описано выше, и используют для определения удельного веса твердой фазы почвы.

**Подготовка почвы для анализа.** Из коробочного образца воздушно-сухой почвы берут среднюю пробу 150—200 г. Из почвы удаляют сор, крупные корни отбирают и сохраняют. Орштейны, журавчики и прочие закономерно встречающиеся включения оставляют в ней. Пробу растирают в ступке и просеивают через сито с диаметром отверстий в 1 мм.

Измельчение в ступке и просеивание следует повторять до тех пор, пока вся проба почвы не пройдет сквозь сито. Если на сите остается гравий (частицы размером 1—3 мм), его измельчают в металлической ступке и смешивают с мелкоземом. Отобранные крупные корни режут ножницами на мелкие кусочки (2—3 мм) и также смешивают с мелкоземом. Подготовленный таким образом образец тщательно перемешивают и сохраняют в закрытой стеклянной банке, картонной коробке или пакетике с соответствующей этикеткой.

**Определение удельного веса твердой фазы почвы.** а) *Определение удельного веса твердой фазы незасоленных почв.* Из подготовленного образца почвы берут средние пробы: в пикнометры — для определения удельного веса твердой фазы — 8—10 г и в сушильные стаканчики для определения влажности — 4—5 г. После взвешивания сушильные стаканчики с почвой помещают в сушильный шкаф и высушивают почву при температуре 105°C до постоянного веса. Рассчитывают гигроскопическую влажность в % (см. гл. V), которую используют при расчете абсолютно сухой навески, взятой для анализа.

Пикнометры с почвой взвешивают, наливают в них дистиллированную воду в таком количестве, чтобы после смачивания почва была покрыта слоем воды в 3—5 мм. Осторожно перемешивают почву с водой (не размазывая по стенкам пикнометра). Пикнометры оставляют открытыми на 10—12 час. Чем лучше будет смочена почва, тем меньше адсорбированного воздуха останется на поверхности ее частиц, тем, следовательно, точнее будут результаты. С этой же целью производится и последующая операция: через 10—12 час пикнометры открытыми ставят в пустой эксикатор с тубусом, из которого с помощью насоса откачивают воздух до внутреннего давления в 160 мм. В разреженном эксикаторе пикнометры выдерживают в течение часа. За это время воздух из воды и почвы почти весь удаляется. Через час в эксикатор впускают воздух (открыть кран), пикнометры вынимают и доливают доверху дистиллированной водой без CO<sub>2</sub>.

Постукивая пальцем или карандашом по стенкам пикнометра, удаляют остатки воздуха из почвы. Пузырьки, застрявшие в горле пикнометра, разбивают механически с помощью тонкой

стеклянной палочки или металлической проволочки, а сохранившиеся и после этого пузырьки могут быть удалены прибавлением 1—2 капель эфира. Всплывшие корешки быстрым вращением тонкой стеклянной палочки или проволочки ввинчиваются во внутрь жидкости. Пикнометр закрывают пробкой, обтирают сухим полотенцем. В кристаллизаторе или в специальном лотке с гнездами переносят в весовую комнату и через 20—25 мин взвешивают.

При отсутствии вакуумной установки для удаления воздуха применяют часовое кипячение (час с момента начала кипения). В таком случае после 10—12-часового смачивания почвы в пикнометр наливают дистиллированную воду до  $\frac{1}{2}$  объема и ставят его на песчаную или этернитовую плитку. При этом необходимо следить за пикнометрами и не допускать бурного кипения.

После часового кипячения пикнометр и его содержимое охлаждают и доливают водой доверху. Дальнейшие операции те же, что и в случае применения разрежения.

Расчет удельного веса твердой фазы почвы производят по формуле:

$$d = \frac{P_1 \cdot 100}{(100 + W_2) \cdot V}, \quad (19)$$

где  $d$  — удельный вес твердой фазы почвы;

$P_1$  — вес воздушно-сухой почвы в граммах;

$V$  — объем почвы в  $см^3$ ;

$W_2$  — влажность образца почвы.

Для наглядности приводим ход расчета:

Вес пикнометра . . . . .	$a$
Вес пикнометра + воздушно-сухая почва . . . . .	$a + P_1$
Вес воздушно-сухой почвы в пикнометре . . . . .	$P_1 = (a + P_1) - a$
Гигроскопическая влажность в % . . . . .	$W_2$
Вес абсолютно сухой почвы в пикнометре . . . . .	$P = \frac{P_1 \cdot 100}{100 + W_2}$
Вес пикнометра + абсолютно сухая почва . . . . .	$P_2 = a + P$
Вес пикнометра + почва + вода . . . . .	$P_3$
Вес долитой воды . . . . .	$P_3 - P_2$
Температура долитой воды . . . . .	$t^\circ$
Плотность долитой воды . . . . .	$D$
Объем долитой воды . . . . .	$V_1 = \frac{P_3 - P_2}{D}$
Объем пикнометра . . . . .	$V_2$
Объем почвы в пикнометре . . . . .	$V = V_2 - V_1$
Удельный вес твердой фазы почвы . . . . .	$d = \frac{P}{V}$

Расчет производят с точностью до 0,01.

Для верхних почвенных горизонтов определение удельного веса твердой фазы повторяют 3 раза, а при наличии большого количества корней — 5 раз. Для нижних горизонтов допускается — 2 раза. Расхождение в контрольных определениях не должно превышать 0,02.

б) *Определение удельного веса твердой фазы в засоленных почвах.* При определении удельного веса твердой фазы засоленных почв, содержащих легко растворимых солей свыше 0,5%, вместо воды применяют инертные жидкости — бензол, бензин, толуол, ксилол и др. Это вызывается тем, что вода растворяет соли и поэтому получаются неверные, завышенные результаты.

При применении инертных жидкостей анализируемый образец не должен содержать воду, поэтому его предварительно высушивают в сушильном шкафу при температуре 105°C. Затем из сушильного стаканчика образец через воронку с длинной трубкой (доходящей до дна пикнометра) быстро переносят в пикнометр. Закрытый пробкой пикнометр с почвой взвешивают. Почву в пикнометре заливают инертной жидкостью, слоем в 5—10 мм, и оставляют на 10—12 час для вытеснения воздуха. Затем помещают на час в вакуум и после этого пикнометр заполняют жидкостью доверху, закрывают пробкой, вытирают полотенцем и немедленно взвешивают. Все операции по наполнению пикнометра жидкостью производят в весовой комнате, где хранится и жидкость. Это ускоряет процесс работы, а следовательно, повышает точность, так как органические жидкости быстро испаряются.

Применяемая жидкость должна быть чистой. Необходимо учитывать изменение удельного веса ее в соответствии с изменением температуры.

В случае отсутствия данных по удельному весу жидкости его определяют. Для этого пикнометр наполняют данной жидкостью и взвешивают. Поделив вес жидкости на объем пикнометра, вычисляют удельный вес жидкости при данной температуре. Вычисление удельного веса почвы при работе с инертной жидкостью производят так же, как и при работе с водой.

Ниже приводится форма записи и порядок вычисления при определении удельного веса твердой фазы почвы (табл. 20 и 21).

**Необходимое оборудование.** Пикнометры объемом 100 см<sup>3</sup> или 50 см<sup>3</sup> с притертыми пробками; стеклянные сушильные стаканчики; эксикатор с тубусом для разрежения, эксикатор с CaCl<sub>2</sub> для хранения навесок почвы после высушивания; колба объемом 2—3 л для кипячения воды; бутылки или колбы объемом 2,1 и 0,5 л для хранения прокипяченной воды; капельницы для воды, спирта, эфира; фарфоровая ступка и пестик с каучуковым наконечником, металлическая ступка; сито с диаметром отверстий в 1 мм; большой кристаллизатор или деревянный лоток с ячейками для переноски пикнометров; стеклянная пластинка для взятия средней пробы; пинцет; роговая или

металлическая ложечка; ножницы; стеклянная палочка; полотенце; сушильный шкаф; весы аналитические с разновесом; настольная воздуходувка или груша для продувания пикнометра.

Таблица 20

Определение объема пикнометра

№ пикнометра	Вес пикнометра с водой			Вес воды в пикнометре			Температура воды			Объем воды или объем пикнометра	Средний объем пикнометра
	1 взв.	2 взв.	3 взв.	1 взв.	2 взв.	3 взв.	При 1—взв.	При 2—взв.	При 3—взв.		

Таблица 21

Определение удельного веса твердой фазы почвы

Почва, уголье, пункт	Горизонт, глубина в см	№ пикнометра	Вес пикнометра $a$	Вес пикнометра + воздушно-сухая почва $a + P_1$	Вес воздушно-сухой почвы в пикнометре $P_1 = (a + P_1) - a$	Гигроскопическая влажность в % $w_2$	Вес абсолютно сухой почвы в пикнометре $P = \frac{P_1 \cdot 100}{100 + w_2}$	Вес пикнометра + абсолютно сухая почва $P_2 = a + P$
Вес пикнометра + почва + вода $P_3$	Вес долитой воды при данной $t^\circ\text{C}$ $P_3 - P_2$	Температура воды $t^\circ\text{C}$	Плотность воды при данной температуре $D$	Объем долитой воды $v_1 = \frac{P_3 - P_2}{D}$	Объем пикнометра $v_2$	Объем почвы в пикнометре $v = v_2 - v_1$	Удельный вес твердой фазы почвы $d = \frac{P}{v}$	

## УДЕЛЬНЫЙ ВЕС СКЕЛЕТА ПОЧВЫ

Удельным весом скелета почвы называется отношение веса абсолютно сухой почвы в ненарушенном состоянии (со скважинами) определенного объема к весу воды того же объема при 4°C (в данном случае речь идет о твердой и газообразной фазах почвы). Эту величину называют также объемным весом. Численно они равны, но следует различать, что удельный вес скелета почвы — величина отвлеченная, а объемный вес — величина именованная — вес почвы в единице объема, напр.,  $г/см^3$ ,  $кг/л$  и т. п.

Удельный вес скелета почвы необходим для решения ряда практических задач: вычисления порозности (скважности) почвы; вычисления веса почвенных напластований при расчетах запасов воды, питательных веществ, при учете объема земляных работ. По удельному весу скелета верхних горизонтов можно судить об окультуренности почвы.

Величина удельного веса скелета почвы зависит от механического состава, структурности, сложения почвы и изменчива как в пространстве, так и во времени, особенно для верхних горизонтов. Определение удельного веса скелета почвы нужно проводить по генетическим горизонтам, приурочивая к их середине. Пахотный горизонт характеризуется более подробно — по всей его глубине — (с поверхности, с 10 см и глубже). Для взятия образцов по глубинам готовят площадки на одной из сторон почвенного разреза (см. рис. 1).

Для определения удельного веса скелета почвы предложено несколько методов и приборов, основанных на разных принципах. Наиболее известны буровой, фиксажный, вазелиновый, песчаный методы, а также метод, где определение ведется с помощью жидкостей.

Буровой метод основан на взятии образца почвы в ненарушенном сложении с помощью цилиндра-бура определенного объема. В настоящее время имеется много вариантов буров. Некоторые из них имеют определенное целевое назначение: бур для взятия образцов торфяных почв, лесной подстилки и т. п.

Фиксажный метод основан на применении различных веществ (парафин, спермацет, бакеллит, некоторые смолы и т. п.), фиксирующих взятый образец почвы. Объем образца определяется количеством вытесненной им жидкости или гидростатическим взвешиванием.

Методы вазелиновый и песчаный основаны на измерении объема взятой почвы с помощью сыпучих или жидких веществ. Образец почвы при этом берут буром или ножом без сохранения его естественного сложения. Вес взятого образца определяют взвешиванием, а объем — заполнением образовавшейся пустоты после взятия образца, сыпучим или жидким веществами.

**Определение удельного веса скелета почвы буровым методом.** Наиболее распространен метод и прибор, разработанные Н. А. Качинским.

Описание прибора (рис. 28). Прибор состоит из стальных цилиндров-буров объемом около 100 (2) и около 500  $см^3$  (1) для взятия образца почвы с ненарушенным строением; направителя (3) для вертикального погружения цилиндров (малых) в почву; шомпола (4) для вдавливания цилиндра в почву; молотка (5) для забивания цилиндра в случае взятия образца из уплотненного горизонта; ножа (6), лопаточки (7) и совка (8) для выемки цилиндра с почвой и удаления излишков почвы, алюминиевых банок с крышками (9, 10) для хранения взятого почвенного образца.

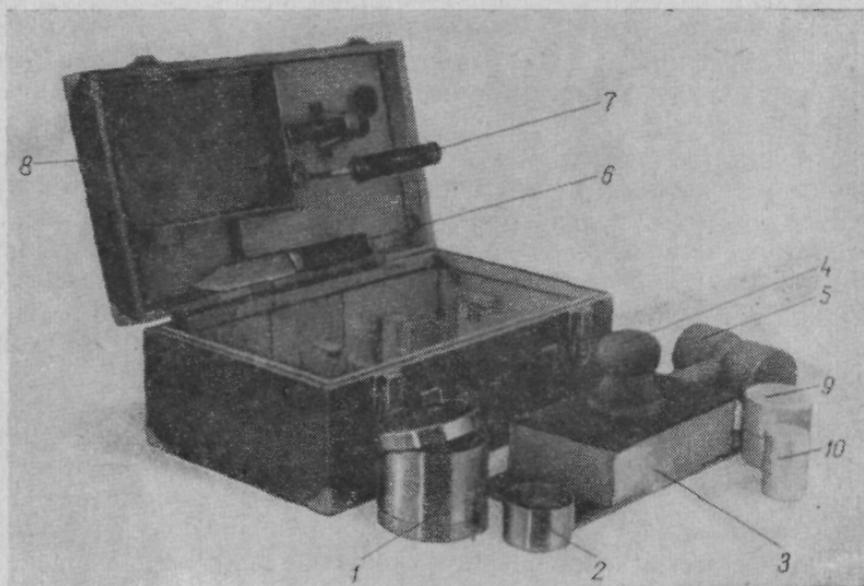


Рис. 28. Прибор Качинского для определения удельного веса скелета почвы:

1 — стальной цилиндр-бур объемом 500  $см^3$ , 2 — бур объемом 100  $см^3$ , 3 — направитель, 4 — шомпол, 5 — молоток, 6 — нож, 7 — лопаточка, 8 — совок, 9, 10 — алюминиевые стаканы

Цилиндры-буры для взятия образца почвы в данном приборе низкие, но широкие. Диаметр режущей части цилиндра делается на 1 мм меньше остальной его части. То и другое обеспечивает взятие образца без прессования. Примерные размеры цилиндра-бура малого: высота 40 мм, диаметр режущей части — 56 мм, диаметр остальной части — 57 мм. При объеме цилиндра-бура около 500  $см^3$  высота его 80 мм, диаметр режущей части — 87 мм, диаметр остальной части — 88 мм.

Большой цилиндр-бур используют для взятия образца из рыхлого пахотного горизонта. Малым цилиндром-буром берут

образцы из уплотненных горизонтов. Определения можно проводить и одним малым буром по всем горизонтам, в таком случае необходимо увеличить контроль в работе.

Цилиндр погружают в почву с помощью направителя и шомпола. Направитель представляет собой колодку из прочного дерева с цилиндрическим отверстием в середине такой же высоты, как и цилиндрическая часть шомпола. Шомпол имеет диаметр, равный внешнему диаметру цилиндра. Изготавливают его из крепкого дерева; для прочности его цилиндрическую часть заключают в металлическую оправу.

**Техника работы.** На подготовленную ровную поверхность почвы устанавливают направитель. В отверстие направителя вкладывают цилиндр, стенки которого предварительно слегка смазывают вазелином. С помощью шомпола цилиндр погружают в почву. Как только шомпол войдет в отверстие направителя до плечика, цилиндр будет погружен в почву на полную глубину. В тех случаях, когда образец берется на сухих и плотных почвах, по головке шомпола ударяют деревянным молотком (следует избегать резких ударов).

После погружения цилиндра в почву на всю глубину снимают направитель и, закрыв цилиндр шомполом, окапывают вокруг его ножом или лопаточкой. Затем почву под цилиндром подрезают таким образом, чтобы с нижней стороны оставался некоторый излишек ее.

Не отнимая шомпола, цилиндр поднимают, переворачивают и острым ножом обрезают почву вровень с нижним краем цилиндра.

Цилиндр с наружной стороны очищают от приставшей почвы, ставят верхним (более широким) краем над банкой. Почву из цилиндра в банку выталкивают с помощью ножа или специального шомпола. Приставшую к стенке цилиндра почву соскабливают ножом и сыпают в банку. Почву из цилиндра в банку следует переносить над листом чистой бумаги или на совочке. Упавшие на них крошки почвы сыпают в банку. Совок рекомендуется делать узким, но высоким, чтобы защищать почву от распыления при переносе ее в банку.

После переноса почвы банку плотно закрывают крышкой и устанавливают в специальный ящик с гнездами. Одновременно со взятием образца для определения объемного веса почвы из этой же точки берут в сушильный стаканчик образец почвы для определения влажности.

В рабочей тетради записывают горизонт и глубину взятия образца, номера банок и сушильных стаканчиков.

Объемный вес почвы в верхних горизонтах определяют с пятикратным контролем, в нижних горизонтах — с тройным; пробу на влажность из верхних горизонтов берут в три стаканчика, из нижних — в два.

Банку с почвой взвешивают с точностью до 0,01 г, затем

почву можно использовать для определения удельного веса твердой фазы, максимальной гигроскопичности, а также для учета корней и т. д.

Зная вес банки с почвой и вес банки пустой, по разности находят вес почвы при данной влажности. Определив влажность в %, рассчитывают вес абсолютно сухой почвы. Делением веса абсолютно сухой почвы на ее объем (объем цилиндра)<sup>1</sup> получают удельный вес скелета почвы.

Форма записи и вычисления удельного веса скелета почвы даны в табл. 22.

Таблица 22

Почва, уголке, пункт	Горизонт, глубина в см	№ банки для образца	Вес банки (а)	Вес банки + сырая почва (б)	Вес сырой почвы $P_1 = (б - а)$	Влажность в % (з)	Вес абсолютно сухой почвы $d = \frac{(P \cdot 100)}{100 + z\%}$	Объем почвы (с)	Удельный вес скелета почвы $d_v = \frac{(d)}{c}$

**Фиксажный метод Пигулевского и Зеберга.** Образец почвы пропитывают фиксажной смесью с заполнением всех пор. Объем зафиксированного образца определяют по объему вытесненной им жидкости. Вес образца узнают после того, как фиксатор из почвы удаляют путем экстрагирования с каким-либо растворителем в аппарате Сокслета. В качестве фиксажной массы применяют смесь парафина с нафталином в соотношении 3:1 (три части парафина и одна часть нафталина).

**Ход анализа.** Образец почвы с ненарушенным сложением берут в металлическую форму (ящик, цилиндр) и ставят в сушильный шкаф, где хорошо прогревают при температуре 80—100°C. Когда образец прогреется, его переносят в фиксажную ванну, куда постепенно, порциями, и осторожно по стенке сосуда приливают фиксирующую массу (парафин + нафталин), имеющую температуру не более 60—70°C. Чтобы поддерживать фиксирующую массу в расплавленном состоянии, сосуд, в котором производится фиксация, устанавливают в другой, больший по объему, с горячей водой.

Плавку фиксажной массы нужно производить на водяной бане при температуре не выше 70—80°, так как нафталин при температуре 79—80°C возгоняется и пары его вредно действуют на слизистые оболочки носа и глаз.

Сначала образец почвы пропитывают фиксажной массой ка-

<sup>1</sup>) Объем почвы рассчитывают по цилиндру: площадь режущей части умножается на высоту цилиндра.

пильярно, а затем ее наливают в сосуд с избытком — на 6—7 см выше уровня образца. По окончании фиксации сосуд вместе с содержимым помещают на 5—6 час в большой кристаллизатор с холодной водой, лучше со снегом или льдом для охлаждения. Чтобы легче извлечь застывшую массу с почвой из сосуда, последний погружают на 1—2 мин в горячую воду. Цилиндр с образцом очищают от остатка фиксатора.

Образец извлекают из цилиндра и вырезают из него срединную, наименее деформированную часть.

Приготовленный образец взвешивают и опускают на короткое время в расплавленный парафин для получения пленки на поверхности. После охлаждения парафина образец вновь взвешивают, определяют вес парафина, зная его удельный вес, определяют объем парафиновой пленки. Зафиксированный образец погружают в сосуд с жидкостью. Объем вытесненной жидкости соответствует объему образца. Вычитая из объема образца объем парафиновой пленки, определяют объем почвы.

Наконец, зафиксированный образец размельчают, заключают в гильзу из фильтровальной бумаги и помещают в аппарат Сокслета, где фиксирующая масса экстрагируется растворителем, например петралейным эфиром. После этого образец переносят в сушильный стаканчик и высушивают при температуре 105°C до постоянного веса. Определяют вес абсолютно сухой почвы, взятой для анализа.

#### Р а с ч е т:

Вес зафиксированного образца	—	$a$ ;
Вес зафиксированного образца с парафиновой пленкой	—	$a_1$ ;
Вес парафиновой пленки	—	$(a_1 - a) = a_2$ ;
Объем парафиновой пленки	—	$\frac{\text{вес пленки}}{\text{уд. вес парафина}} = v$ ;
Объем зафиксированного образца с парафиновой пленкой (по объему вытесненной воды)	—	$v_1$ ;
Объем почвы ( $v_1 - v$ )	—	$v_2$ ;
Вес абсолютно сухой почвы (после экстрагирования и высушивания)	—	$P$ ;
Удельный вес скелета почвы	—	$\frac{P}{v_2}$

Описанный метод продолжителен по времени и сложен по выполнению, поэтому не может быть рекомендован для массовых анализов, но может быть использован для специальных исследований.

Необходимые материалы и оборудование: парафин, нафталин, растворитель для экстрагирования (например петралейный эфир), фильтровальная бумага, форма для взятия образца почвы с ненарушенным сложением, сосуд для фиксажной массы, сосуд для парафинирования, водяная баня, аппарат Сокслета, нож, прибор Панкова, весы с разновесом, сушильный стаканчик, эксикатор с  $\text{CaCl}_2$ , мерный цилиндр.

**Определение удельного веса скелета почвы с помощью жидкостей.** Сущность этой категории методов заключается в определении объема жидкости, вытесненной погруженным в нее образцом. Предложенные для этой цели приборы-волюметры или объемомеры представляют собой мерные сосуды различного объема и формы, устроенные по двум принципам:

а) при погружении образца сохраняется постоянный уровень жидкости в сосуде, но изменяется ее количество путем сливания (Панков, Димо и др.);

б) при погружении образца сохраняется постоянным количество жидкости, но изменяется ее уровень в сосуде (Фростериус, Виленский, Крохина, Димо, Ширшов и др.).

В качестве жидкости в волюметрах используют ртуть (Фростериус, Виленский, Сидери, Крохина), воду (Панков, Димо и др.). При использовании ртути исследуемые образцы не покрывают непроницаемой пленкой, в случае же применения в качестве вытесняемой жидкости воды образец должен быть покрыт водонепроницаемой пленкой.

Вещество, применяемое для покрытия, должно давать тонкую, быстро подсыхающую, водонепроницаемую и нерастворимую в воде пленку. Применяют резиновый клей, коллодиум, растворы различных смол, лаки, а также парафин и парафин в смеси с другими веществами, например нафталином. В случае образования на поверхности образца парафиновой пленки значительной толщины, при расчете необходимо учитывать ее объем.

Достоинством данных методов является быстрота в работе, а также возможность определения объема образца различной формы и размера — от монолита до мелких агрегатов. Этот метод применим для связных почв и не применим для почв легкого механического состава, скелетных, а также для почв рыхлого сложения.

Для определения объема ненарушенного образца более удобными, так как не требуется предварительной фиксации образца, являются объемомеры, в которых в качестве жидкости используют ртуть. Известно несколько видов подобных объемомеров, отличающихся лишь по конструкции.

а) Объемомер (волюметр) Виленского (рис. 29) предназначен для определения объема агрегатов. Волюметр представляет собой два стеклянных цилиндрических сосуда объемом 15—20 см<sup>3</sup> каждый, соединенных между собой тонкой градуированной (одно деление = 0,01 см<sup>3</sup>) трубкой, имеющей

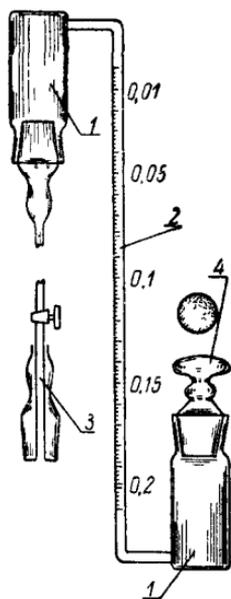


Рис. 29. Ртутный волюметр для определения объема агрегатов:

1 — стеклянные цилиндрические сосудики, 2 — градуированная трубка, 3, 4 — пробки

форму буквы *g*. Сосудики закрывают хорошо притертыми пробками. Возможны два варианта пробок: в дно пробки вставлен стеклянный фильтр, не пропускающий ртуть, или через пробку проходит очень тонкая капиллярная трубка, закрывающаяся краном. В сосудик наливают ртуть так, чтобы заполнилась и часть градуированной трубки. Уровень ее отмечают по шкале и записывают. При заполнении сосудика волюметра ртутью воздух из него вытесняется через пористое дно или капилляр трубки. В сосуд со ртутью помещают исследуемый агрегат (размером 5—3 или 2—3 мм), предварительно взвешенный, и закрывают сосуд пробкой. Агрегат вытесняет часть ртути, уровень ее в градуированной трубке изменяется. Разность уровней ртути до погружения и после погружения агрегата есть объем ртути, соответствующий объему агрегата. Зная вес агрегата и его объем, рассчитывают объемный вес агрегата, а затем его порозность по вышеприведенной формуле (17).

б) Объемомер Крохиной (рис. 30). Прибор состоит из двух, строго одинаковых по объему колб, соединенных между собой градуированной трубкой (каждое деление равно  $0,1 \text{ см}^3$ ). Верхняя колба имеет шлифованную пробку. В нижнюю колбу налита ртуть до метки в трубке. Сняв пробку с верхней колбы, помещают в нее измеряемый образец и закрывают плотно пробкой. Пробку нужно хорошо закрепить или поддерживать рукой. Переворачивают прибор так, чтобы верхняя колба оказалась внизу, а нижняя — наверху. Ртуть перетечет из одной колбы в другую, и так как часть объема в этой колбе занята образцом, то она заполнит некоторый объем градуированной трубки, что будет соответствовать объему образца. Прибор переворачивают в исходное положение и вынимают из него образец, который высушивают до постоянного веса и взвешивают. Делением веса абсолютно сухого образца на его объем получают удельный вес скелета (объемный вес).

Можно также взвесить образец до определения его объема, при состоянии естественной влажности. Принимая в расчетах этот вес, получают объемный вес почвы в естественном состоянии.

**Определение удельного веса скелета почвы по методу С. Н. Пустовойта.** Метод основан на том, что всякое физическое тело имеет объем, который равен объему вытесненного им воздуха. Автором метода предложен простой прибор (рис. 31), который представляет собой воронку (1) с краном и хорошо притертой стеклянной пластиной (2). Диаметр воронки может быть различный, в зависимости от чего может быть различен



Рис. 30.  
Объемомер  
Крохиной

объем испытуемого образца (от комков объема 150—200 см<sup>3</sup> до зернистых отдельностей). Диаметр пластины должен быть на 1—2 см больше диаметра воронки.

**Ход анализа.** Комок почвы в ненарушенном сложении взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г. Размер комка определяют объемом имеющейся воронки. Взвешенный комок помещают на стеклянную пластину (2) и накрывают воронкой (1) при закрытом кране. Одной рукой держат воронку за трубку выше крана, а другой — плотно прижимают пластину (2) к воронке. Воронку с почвой переносят в сосуд и погружают в воду на 5—8 см.

Под водой почву из воронки быстро удаляют, для чего пластину отнимают от воронки, сначала опустив ее вниз, а затем отведя в сторону. Нельзя допускать, чтобы в воронку попали пузырьки воздуха, вытесняемого из почвы при погружении ее в воду. На место удаляемой почвы в воронку поступает вода, объем которой и определяют. Для этого, не вынимая воронки из воды, приблизи-

тельно выравнивают поверхность воды в воронке с поверхностью воды в сосуде (поднимая или опуская воронку). Затем под водой воронку плотно закрывают пластиной (2), вынимают из воды и, опрокинув, отнимают пластину. Воду из воронки через край переливают в мерный цилиндр или бюретку и определяют ее объем. Объем воды соответствует объему почвы. Поделив вес комка почвы на его объем, получают объемный вес исследуемого образца. Делают еще несколько контрольных определений и рассчитывают среднее значение.

Метод быстрый и простой и может быть применен для определения объемного веса связных образцов из нижних горизонтов. Объемный вес рассчитывают для почвы абсолютно сухой или при данном состоянии влажности.

**Необходимое оборудование:** воронка с притертым краем или несколько воронок разного объема, стеклянная пластинка к воронке, мерный цилиндр или бюретка, сосуд для воды, весы технические с разновесом.

**Песчаный метод определения объемного веса почвы.** Метод основан на том, что из почвы вынимают некоторый объем ее, а образовавшееся при этом углубление заполняют отсеянным

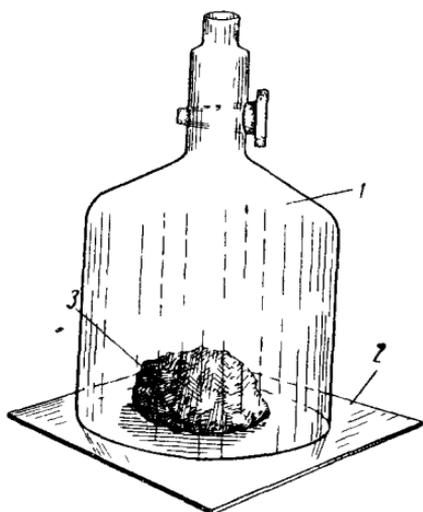


Рис. 31. Прибор Пустовойта для определения удельного веса скелета почвы:

1 — стеклянная воронка, 2 — шлифованная стеклянная пластинка, 3 — образец почвы

сухим песком, объем которого строго учитывают. Метод прост, не требует специального оборудования. Может быть рекомендован для определения объемного веса скелетных почв. Ф. Р. Зайдельманом подробно разработана методика применительно к этим почвам. Считаю целесообразным разобрать данный метод определения применительно к каменистым почвам.

**Ход анализа.** Площадку, предназначенную для взятия образцов, выравнивают. Выступающую на поверхность часть каменистых отдельностей тщательно очищают от мелкозема и на нее наносят метку по линии касания с дневной поверхностью. На подготовленной площадке делают углубления на 8—12 и 15—17 см; чем тяжелее материал, переслаивающий каменистые отдельности, тем глубже делают выемку. Извлекаемую (совком, ножом) из углубления пробу каменистой почвы тщательно собирают и взвешивают. Выемку заполняют просеянным сухим песком, объем которого строго учитывают. Из пробы отделяют мелкоземистую часть (частицы  $< 3$  мм) промывкой всей почвы на сите с отверстиями  $d=3$  мм в текучей воде.

Промытые каменистые отдельности сушат до воздушно-сухого состояния и определяют их общий вес  $g_s$ . По разности между общим весом пробы и весом каменистой фракции определяют вес воздушно-сухого мелкозема; зная влажность, находят вес абсолютно сухого мелкозема. В результате рассчитывают общий вес образца сухой каменистой почвы ( $g$ ), взятой для определения удельного веса скелета почвы (абс. сухой вес мелкозема + вес воздушно-сухих каменистых отдельностей).

Затем определяют объем каменистых отдельностей и общий объем извлеченного образца. Сначала определяют объем той части каменистых отдельностей, которая выступает над дневной поверхностью. Для этого каждый образец отдельно погружают в цилиндр, наполненный водой до метки, нанесенной на его поверхность при выемке. Объем воды, вытесненный погружением выступающих частей каменистых отдельностей, измеряют. Сумма этого объема и объем песка, употребленного на заполнение выемки, составляют общий объем извлеченного образца каменистой почвы в естественном сложении ( $V$ ).

Суммарный объем каменистых фракций определяют погружением их в наполненный водой большой цилиндр. Объем вытесненной воды соответствует объему каменистых фракций ( $V_s$ ).

Расчет:

1. Общий удельный вес каменистых почв:

$$d_v = \frac{g}{V}, \quad (20)$$

2. Удельный вес мелкозема, заполняющего пространства между каменистыми отдельностями:

$$d_v = \frac{g - g_s}{V - V_s}, \quad (21)$$

где  $g$  — вес сухой почвы;

$g_s$  — вес каменистых отдельностей.

Необходимые материалы и оборудование для работы: отсеянный сухой песок, совок, нож, мерный цилиндр, бумага фильтровальная, бумага оберточная, весы на 10 кг с разновесом.

Для заполнения выемки, после извлечения образца из почвы, применяют также вазелин (метод предложен Тюремновым С. И. и в дальнейшем разработан К. С. Кириченко). Но данный метод более сложен и продолжителен, поэтому не может быть рекомендован для массовых определений.

**Измерение плотности почвы гаммаскопическим методом.** Для измерения объемного веса почвы в настоящее время начинают применять метод, основанный на использовании  $\gamma$ -излучений. Методика аналогична определению влажности почвы, описанной в главе V.

В почву закладывают две параллельные скважины на расстоянии 30—40 см, в одну из них вводят источник  $\gamma$ -излучения ( $\text{Co}^{60}$ ), в другую счетчик. Объемный вес в  $\text{г/см}^3$  рассчитывают по формуле:

$$d_v = \frac{I_n I_0 - \kappa I_n I}{\mu l}, \quad (22)$$

где  $I_0$  и  $I$  — интенсивность  $\gamma$ -излучения  $\text{имп/мин}$  в воздухе и после прохождения через слой почвы;

$\mu$  — линейный коэффициент поглощения лучей почвой; по данным многих исследователей, равен коэффициенту поглощения для воды —  $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ ;

$l$  — расстояние между скважинами;

$\kappa$  — коэффициент, учитывающий влияние на счетчик рассеянного излучения.

Некоторые исследователи считают, что влияние рассеянного излучения при учете плотности незначительно и коэффициент  $\kappa$  не вводят в формулу.

Пример вычисления: определить плотность супесчаной почвы в уплотненном слое на глубине 40—50 см. Расстояние между скважинами — 35,5 см. Интенсивность  $\gamma$ -излучения на поверхность почвы  $I = 575 \text{ имп/сек}$ , при просвечивании слоя почвы на глубине 40—50 см  $I = 24 \text{ имп.}$ ,  $\mu = 0,044 \text{ см}^{-1}$ ,  $\kappa = 1$ , тогда

$$d_v = \frac{I_n 575 - I_n 24}{0,044 \cdot 35,5} = 2,04 \text{ г/см}^3.$$

Таким путем определяют плотность влажной почвы ( $d_v$ ). Для определения объемного веса сухой почвы этим методом влажность должна быть постоянной и известной, что методически довольно трудно осуществить.

## ПОРОЗНОСТЬ ПОЧВЫ

Отдельные механические элементы и структурные отдельные в почве неплотно прилегают друг к другу. Между ними образуются промежутки, различные по величине и форме, которые принято называть порами. Совокупность этих пор составляет порозность почвы. Порозность почвы выражают в % объема

Порозность, размер и форма пор зависят от механического состава—величины и формы механических элементов, структуры почвы—количества, величины и формы структурных отдельных, а также от расположения их относительно друг друга. Поэтому порозность различных почв и внутри почвы по генетическим горизонтам неодинаковая.

В почвах бесструктурных величина порозности обуславливается крупностью механических элементов и их сложением. Наиболее высокая и агрономически ценная порозность в структурной почве. С глубиной по профилю почвы порозность уменьшается.

Общая порозность в структурной почве складывается из порозности внутри агрегатов и между ними. При этом возможно несколько комбинаций сложения: а) рыхлые агрегаты рыхло уложены между собой; б) рыхлые агрегаты уложены между собой плотно; в) плотные агрегаты рыхло уложены и, наконец, г) плотные агрегаты плотно уложены между собой. Различные комбинации укладки (сложения) дают различное количественное и качественное выражение порозности.

В отличие от механического состава, который длительное время остается без изменения, структура почвы изменяется во времени, что связано с ее прочностью и связностью. С изменением структурного состояния изменяется и порозность почвы.

До недавнего времени различали общую порозность почвы, которая представляет общий объем пор, и подразделяли ее на капиллярную и некапиллярную.

Подобная классификация не могла характеризовать истинную картину соотношения воды и воздуха в почве, от чего в свою очередь зависит жизнь почвы. Поэтому в последнее время (Дояренко, Качинский и др.) пришли к необходимости дифференцировать поры в почве, подразделяя их в отношении передвижения воды на активные и неактивные. Под активными порами понимают такие поры, внутри которых возможно передвижение свободной воды под действием менисковых сил и силы тяжести. Неактивные поры — тонкие, которые при увлажнении сплошь заполняются связанной водой, удерживаемой молекулярными силами и недоступной растениям. В таких порах свободная вода передвигаться не может. Эти поры агрономически отрицательны.

Крупные поры в почве большую часть времени заняты воздухом и лишь при сильном увлажнении они служат каналами для транзитного тока воды. Это поры аэрации.

Н. А. Качинский порозность в почве дифференцирует по

занятости пор различными категориями воды: 1) объем пор, занятый прочно связанной (максимально-гигроскопической) водой; 2) объем, занятый рыхло связанной (пленочной) водой; 3) объем пор, занятый капиллярной водой (активная порозность), и 4) объем пор, занятый воздухом. Кроме того, выделяют: 5) порозность отдельного агрегата, 6) порозность агрегатную (суммарную) и 7) порозность межагрегатную.

Наибольшую агрономическую значимость имеют поры активные, занятые капиллярной водой, и поры аэрации, причем последние должны составлять 20 — 25% общей порозности.

Порозность — одно из важнейших свойств почвы. Ею обуславливаются, в основном, водный и воздушный режимы почвы. От величины пор зависит передвижение воды в почве: водопроницаемость и водоподъемная способность, мобильность воды. С порозностью связаны влагоемкость и воздухоемкость почв.

Особо важное значение имеет порозность в орошаемых почвах, обуславливая глубину просачивания воды, капиллярный подъем грунтовых вод и процессы испарения.

Порозность почв и грунтов имеет очень большое значение также при практическом их использовании под фундаменты или в качестве строительных материалов. Высокая порозность вызывает деформации, усадку основания. И если в агрономических целях усилия направлены на увеличение порозности, то грунтоведение решает вопросы снижения ее до минимальных пределов, поэтому изучению порозности придается большое значение.

Для определения пор капиллярных и некапиллярных, активных и неактивных предложено несколько методов, которые можно разбить на две группы: 1) определение порозности с помощью приборов; 2) определение порозности методом расчетов.

### Определение порозности с помощью приборов

Предложено несколько приборов и методов, в основу которых положены различные принципы. Например: 1) «метод вытеснения», основанный на вытеснении из почвы одной жидкости, заполняющей поры, другой жидкостью, не смешивающейся с первой (вода — бензол) под прогрессивно возрастающим давлением (Бехольд, Колясев, Агапов); 2) метод, основанный на усилии, которое требуется для отсасывания воды из почвы (Кин, Ричардсон, Лимер, Дояренко). Из насыщенного водой образца почвы отсасывают воду под определенным отрицательным давлением, изменяя его в определенных пределах. В зависимости от прилагаемого давления будет извлекаться вода из пор определенного размера и объем ее будет соответствовать объему этих пор. Водоудерживающую силу капилляров определяют по формуле Жюрена:

$$H = \frac{2A}{grD},$$

где  $H$  — высота поднятия столба жидкости;

$2A$  — капиллярная постоянная воды;

$r$  — радиус капилляра в  $см$ ;

$D$  — плотность жидкости;

$g$  — ускорение силы тяжести ( $981 \text{ см/сек}^2$ ).

Зная величину давления, по формуле Жюрена рассчитывают диаметр пор, из которых отсасывают воду.

По этому принципу построен прибор Дояренко для определения дифференциальной порозности (рис. 32). Прибор состоит из следующих частей:

воронка (1) с пористой стеклянной пластинкой, в которую помещают почву нарушенного сложения.

Плотность пористой пластинки должна быть такой, чтобы, будучи насыщена водой, она не пропускала воздуха при отрицательном давлении в  $60 \text{ см}$  водного столба, что отвечает диаметру капилляров в  $50 \mu$ . Плотность пластинки не сказывается на результатах анализа; она влияет на предельные размеры определяемых пор и скорость определения. Так, пластинки № 2 выдерживают разрежение в  $60 \text{ см}$  и позволяют определять промежутки до  $50 \mu$  (приблизительно в течение  $3-4 \text{ час}$ ); пластинка № 4 выдерживает разрежение в  $600 \text{ см}$  водного столба и позволяет определять промежутки в  $5 \mu$ , но для анализа требуется  $10-15 \text{ час}$ .

Для большинства случаев можно ограничиться размерами промежутков в  $50 \mu$ . В воронку можно помещать как насыпной образец, так и образец в естественном сложении, беря его специальным патроном.

Цилиндр (2) для взятия образца в естественном сложении, с ненарушенной структурой, и зажим (3), удерживающий цилиндр на пористой пластинке в воронке. Цилиндр представляет собой кольцо диаметром  $3 \text{ см}$  и высотой  $3 \text{ см}$ , закрывающееся крышкой. Нижняя режущая часть цилиндра остро заточена. Цилиндр изготовляют из тонкой стали. Зажим состоит из метал-

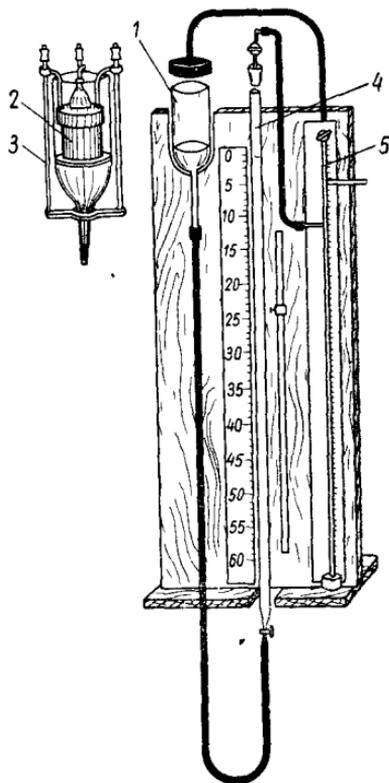


Рис. 32. Прибор для определения дифференциальной порозности почвы:

1 — воронка для почвы нарушенного сложения, 2 — цилиндр для почвы с ненарушенной структурой, 3 — зажим для закрепления цилиндра, 4 — бюретка, 5 — манометр

лической пластинки с отверстием для воронки. От пластинки вверх отходят три металлических стержня с винтовыми гайками на концах. На стержни сверху надевают кольцо с тремя отростками. Кольцо опускают внутрь воронки на поставленный в нее цилиндр с почвой, закрытый резиновой крышкой, на которую и ложится кольцо. Гайками кольцо прижимает цилиндр к пористой пластинке. В резиновой крышке имеется отверстие, в которое вставляют стеклянную трубку, соединенную каучуковой трубкой с насосом.

Нижнюю часть воронки соединяют резиновой трубкой с бюреткой, которую устанавливают параллельно воронке и которую можно передвигать. Между воронкой и бюреткой помещают вертикально миллиметровую линейку в 60 см. Нуль линейки должен совпадать с поверхностью пористой пластинки.

На этом приборе можно определить дифференциальную порозность (до диаметра пор 50  $\mu$ ). Для определения более мелких капилляров требуется добавочное разрежение от небольшого насоса (ручного, велосипедного).

Ход определения. 1) Вначале определяют емкость воронки до какой-либо заранее сделанной метки. Для этого бюретку, резиновую трубку и нижнюю часть воронки наполняют водой. Поднятием и опусканием бюретки насыщают водой пластинку воронки. Устанавливают бюретку так, чтобы уровень воды в ней точно совпал с нулем линейки (верхняя поверхность пластинки) и отмечают его. Поднятием бюретки наполняют воронку водой до метки и после этого отсчитывают уровень воды в бюретке.

Разность отсчетов соответствует объему воронки. Опустив бюретку, дают воде стечь из воронки обратно в бюретку и устанавливают ее вновь так, чтобы уровень воды совпал с нулем линейки. Пористая пластинка должна быть полностью насыщена водой, но на поверхность ее вода не должна выступать. Отмечают уровень воды в бюретке.

2) Воронку до метки заполняют почвой. Вес взятой почвы определяют по разности между весом образца, подготовленного для анализа, и остатком после заполнения воронки.

Во время насыпания почвы происходит ее капиллярное насыщение и уровень воды в бюретке понижается. Поднятием бюретки его поддерживают на нуле линейки. Окончание капиллярного насыщения устанавливают по прекращению падения уровня воды в бюретке. Затем отмечают уровень воды в бюретке после капиллярного насыщения. По времени от начала до конца насыщения получают данные о скорости капиллярного поднятия в пределах высоты слоя почвы в воронке. После окончания капиллярного насыщения бюретку поднимают вверх так, чтобы уровень воды в ней совпал с поверхностью почвы в воронке. При этом все поры будут заполнены водой.

Для удаления воздуха, зажатого в почвенных порах, приме-

Разрежение в см водного столба, при положении уровня бюретки на делениях линейки	Диаметр капилляров по формуле $d = \frac{3}{h}$	Высота ртутного столба для добавочного разрежения в 60 см водного столба
	Некапиллярные промежутки, гравитационная влага 1 и > 1 мм	
0		
3		
4	0,75—1 »	
6	0,50—0,75 »	
7,5	0,40—0,50 »	
10	0,30—0,40 »	
12	0,25—0,30 »	
15	0,20—0,25 »	
20	0,15—0,20 »	
30	0,10—0,20 »	
40	75—100 μ	
50	60—75 »	
60	50—60 »	
75	40—50 »	1,1
100	30—40 »	2,9
120	25—30 »	4,43
150	20—25 »	6,63
200	15—20 »	10,33
300	10—15 »	17,7
400	7,5—10 »	25,02
500	6—7,5 »	32,5
600	5—6 »	40,0

няют небольшое разрежение (до 15 см рт. ст.) в верхней части воронки (нижний кран бюретки закрыт). Уровень воды в бюретке во время насыщения почвы все время поддерживают на уровне поверхности почвы. Прекращение снижения уровня воды в бюретке указывает, что почва полностью насыщена. Отсчитывают уровень воды в бюретке и вычисляют общую порозность насыщенную водой почвы.

Величину общей порозности сухой почвы вычисляют на основании веса твердой фазы почвы и объемного веса насыпного образца. Разность между порозностью сухой и сырой почвы есть показатели ее набухаемости.

3) Для определения некапиллярных пор бюретку устанавливают так, чтобы уровень воды в ней совпадал с нулем линейки. По мере повышения уровня воды за счет отходящей из почвы гравитационной воды бюретку постепенно понижают, производя отсчеты каждые 5 мин. После прекращения поднятия уровня воды в бюретке делают последний отсчет. Разность между этим отсчетом и отсчетом при полном насыщении соответствует объему некапиллярных пор, заполненных гравитационной водой.

Опускают бюретку до совпадения ее уровня с 3 см и поддерживают на этом уровне до прекращения стекания воды из почвы в бюретку (5-минутные отсчеты).

Разность отсчетов уровней воды при положениях нулевом и 3 см соответствует количеству воды в порах диаметром в 1 мм и более. Таким образом, создавая соответствующее разрежение, можно удалять воду из пор любой заданной величины. Определения ведут до тех пор, пока через пористую пластинку начнет проходить воздух.

Порозность до 50 м определяют с пластинками № 2 при разрежении до 60 см. С плотными пластинами № 3 или 4 возможно определять более тонкие поры. В таком случае до 50 м анализ ведут по описанному способу, а дальше для разрежения применяют насос с ртутным вакуумметром.

Описанный выше способ определения дифференциальной порозности насыпных образцов применяют и для образцов ненарушенного сложения. Пробы почвы берут цилиндрами. Цилиндры с почвой взвешивают и помещают в воронку, слегка прижимая к пластинке. Дальнейший ход работы аналогичен Дояренко дает следующие градации разрежения, соответствующие размерам пор (см. табл. 23).

### Определение порозности методом расчетов по Н. А. Качинскому

Для расчета необходимо знать: удельный вес твердой фазы и удельный вес скелета почвы, а также максимальную гигроскопическую влажность, влагу завядания, общую влагоемкость, т. е. основные характеристики почвы, которые определяют обычно при исследованиях.

Выделяют 9 видов порозности:

1. Порозность общая ( $P_{общ.}$ ):

$$P_{общ} = \frac{d - d_v}{d} \cdot 100, \quad (23)$$

где  $d$  — удельный вес твердой фазы почвы;

$d_v$  — удельный вес скелета почвы.

2. Порозность агрегата ( $P_a$ ):

$$P_a = \left(1 - \frac{P}{d \cdot v}\right) \cdot 100$$

или

$$P_a = \frac{d - d_v}{d} \cdot 100, \quad (24)$$

где  $P$  — вес абсолютно сухого агрегата;  
 $v$  — объем агрегата;  
 $d$  — удельный вес твердой фазы почвы;  
 $d_v$  — объемный вес агрегата.

3. Порозность агрегатная (суммарная) ( $P_{agr}$ )

$$P_{agr} = \frac{P_a(100 - P_{общ})}{100 - P_a}, \quad (25)$$

где  $P_a$  — порозность агрегата<sup>1</sup>;

$P_{общ}$  — порозность общая.

4. Порозность межагрегатная ( $P_{магр.}$ )

$$P_{магр.} = P_{общ.} - P_{agr}. \quad (26)$$

5. Объем пор, занимаемый прочно связанной (максимально гигроскопической) водой ( $P_{м.г.}$ ):

$$P_{м.г.} = (W_{м.г.} \% \cdot dv) : 1,5, \quad (27)$$

где  $W_{м.г.}$  — максимальная гигроскопичность в весовых %;

$d_v$  — удельный вес скелета почвы;

1,5 — плотность воды максимально гигроскопической.

6. Объем пор, занятых рыхло связанной водой ( $P_{р.с.в.}$ )

$$P_{р.с.в.} = (W_{зав.} - W_{мг.}) \cdot dv : 1,25, \quad (28)$$

где  $W_{зав.}$  — влажность завядания растений в весовых %;

1,25 — плотность рыхло связанной воды.

7. Объем пор, занятых капиллярной водой ( $P_k$ ):

$$P_k = (W_{общ.} - W_{зав.}) \cdot dv, \quad (29)$$

где  $W_{общ.}$  — влагоемкость общая (полевая) при поливе водой сверху.

8. Объем пор, занятых водой всех категорий ( $P_w$ ):

$$P_w = P_{м.г.} + P_{р.с.в.} + P_k. \quad (30)$$

9. Объем пор, занятых воздухом, — пор аэрации ( $P_{азр.}$ )

$$P_{азр.} = (P_{общ.} - P_w). \quad (31)$$

Приведенный выше порядок вычислений агрегатной и межагрегатной порозности может быть применим лишь к хорошо оструктуренным почвам (целинам и залежам), где весь объем пор приходится на поры внутри агрегатов и между ними. Для почв, распыленных в той или иной мере, для расчета агрегатной порозности необходимо знать, помимо порозности агрегата, их долю в общем объеме почвы.

<sup>1</sup> При наличии величин порозности агрегатов разной крупности за  $P_a$  берут среднее значение.

Например: в пахотном слое  $P_{общ.} = 60\%$ ;  
 порозность отдельных агрегатов  $P_{\Sigma агр.} = 55\%$ ;  
 доля агрегатов по объему к пахотному слою  $= 80\%$ .  
 Тогда

$$P_{\Sigma агр.} = 55\% \cdot 0,8 = 44\%$$

$$P_{м. агр.} = 60\% - 44 = 16\%.$$

Расчет доли агрегатов в % к объему взятой почвы. Буром берут определенный объем почвы, напр.  $V_n = 500 \text{ см}^3$ . Определяют влажность (взятием добавочного образца) и удельный вес скелета ( $d_v$ ). Рассыпают взятый образец на стекле или бумаге и вручную отбирают крупные комки. Остальную часть почвы просеивают через сито с отверстиями диаметром 0,5 мм. Отсеянную пыль взвешивают. Зная вес пыли в воздушно-сухом состоянии или при естественной влажности и зная ее влажность, находят вес абсолютно сухой пыли ( $P$ ). По весу пыли и удельному весу скелета почвы находят объем пыли.

$$V = \frac{P}{d_v}.$$

Затем вычисляют долю пыли к объему взятой почвы (в данном случае к  $500 \text{ см}^3$ ):

$$\frac{V_n - 100}{V - x}$$

$$x = \frac{V \cdot 100}{V_n} = \%.$$

По разности находят долю агрегатов в почве в % к объему взятой почвы:

$$100 - \frac{V \cdot 100}{V_n} = \%.$$

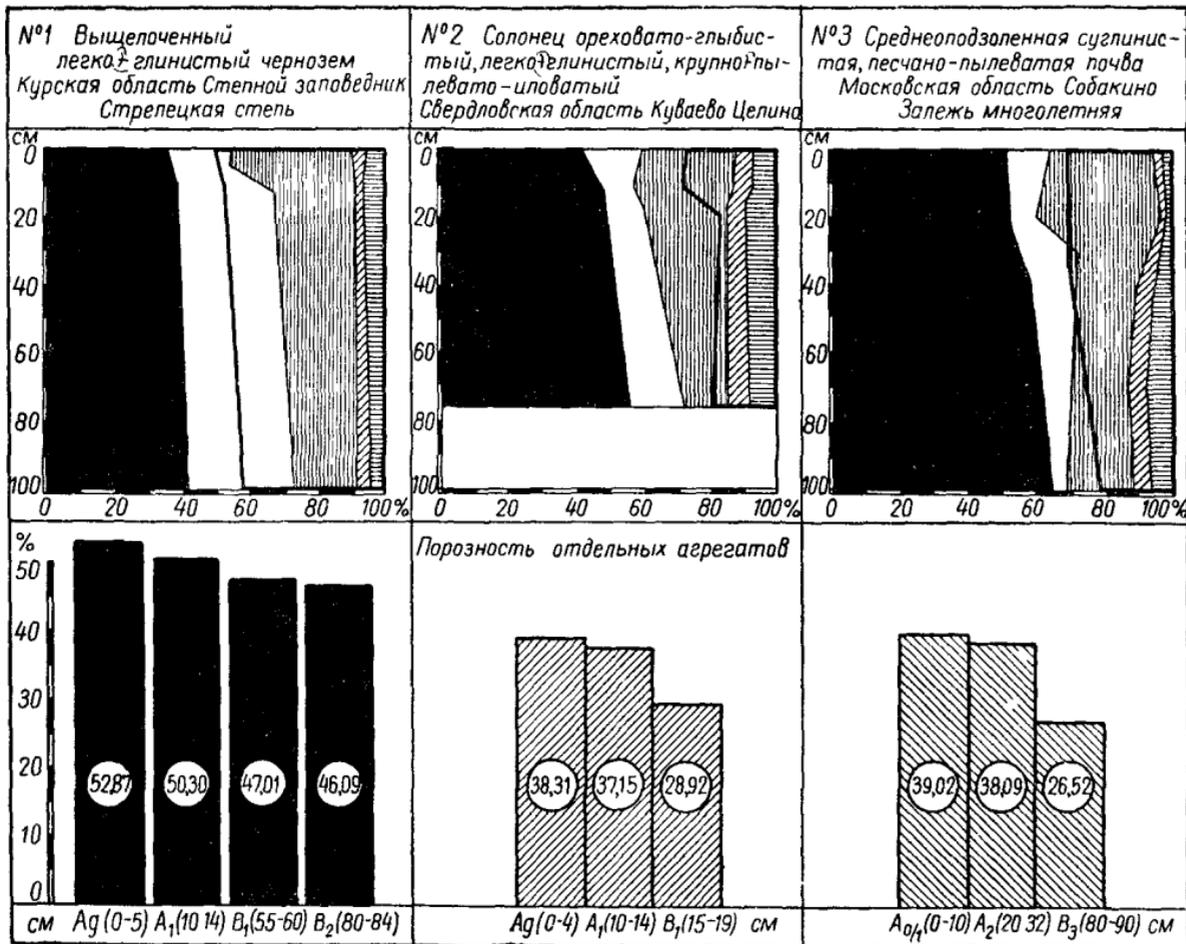
Данные по дифференциальной порозности почвы оформляют по форме табл. № 24 и рис. 33.

Ниже приводим оценку порозности почвы (по Н. А. Качинскому).

Порозность в. %	Оценка
55—65	Культурный пахотный слой
свыше 70	Почва вспушена
50—55	Удовлетворительная для пахотного слоя
<50	Неудовлетворительная для пахотного слоя
25—40	Характерна для уплотненных иллювиальных горизонтов.

Порозность культурной песчаной почвы 45—50%.

Поры, занятые воздухом, должны составлять 20—25% общей порозности.



Условные обозначения:

-  Твердая фаза почвы
-  Порозность общая
-  Поры, занятые прочно-связанной водой
-  Поры, занятые рыхло-связанной водой
-  Капиллярная порозность
-  Порозность аэрации
-  Порозность агрегатная
-  Межагрегатная порозность

Рис. 33. График изображения дифференциальной порозности почвы (в % объема)

## Дифференциальная порозность почв

Почва, угодье, пункт	Горизонт, глубина в см	Удельный вес		Порозность									
		твердой фазы почвы	скелета почвы	общая	в отдельных агрегатах	агрегатная суммарная	межагрегатная	объем пор, занятых:					воздухом при насыще- нии почвы водой до общей вла- госткости
								водой				всего	
								прочно связан- ной	рыхло связан- ной	капил- лярной	всего		
Чернозем выщелоченный, легкогли- нистый, пылевато-иловатый	$A_n$ (0—4)	2,47	1,05	57,49	49,12	41,04	16,45	10,27	6,16	12,81	29,24	28,25	
	$A_n$ (10—14)	2,46	1,18	52,03	—	—	—	11,54	8,65	15,69	35,88	16,15	
	Стерня ржи. Свердловская обл., с. Пульниково	$A_1$ (20—24)	2,48	1,05	57,66	49,72	41,87	15,79	9,43	4,71	11,30	25,44	32,22
	$B_1$ (40—44)	2,61	1,29	50,57	46,49	42,94	7,63	9,07	5,44	15,45	29,96	20,61	
	$B_2$ (60—64)	2,61	1,57	39,84	36,80	35,03	4,81	10,99	6,59	8,20	25,78	14,06	
Солонец ореховато-глыбистый, легко- глинистый, крупнопылевато-иловат- ый	$A_0$ (0—4)	2,46	1,07	56,50	38,31	27,01	29,49	6,69	4,01	28,75	39,45	17,05	
	$A_1$ (10—14)	2,64	1,32	50,00	37,15	29,55	20,45	7,93	4,75	30,73	43,41	6,59	
	Целина. Свердловская обл., с. Ку- ваево	$B_1$ (15—19)	2,73	1,36	50,18	28,92	20,27	29,91	10,17	6,10	24,71	40,98	9,20
	$C$ (60—64)	2,77	1,54	44,40	—	—	—	9,34	5,60	15,55	30,49	13,91	
Дерново-подзолистая, тяжелая, суглинистая иловато-пыле- ватая почва, подстилаемая элювием песчаника	$A_0$ (0—4)	2,22	0,54	75,68	65,67	46,52	29,16	5,40	3,24	25,30	33,94	41,74	
	$A_0 + A_1$ (4—8)	2,41	0,75	68,88	—	—	—	3,65	2,19	29,68	35,52	33,36	
	$A_2$ (10—14)	2,60	1,14	56,19	50,00	43,81	12,38	3,99	2,39	31,38	37,76	18,43	
Лес смешанный. Свердловская обл., с. Подгорное	$B_1$ (26—30)	2,65	1,27	52,07	—	—	—	5,72	3,43	19,99	29,14	22,93	
	$B_2$ (46—50)	2,73	1,37	49,82	35,10	27,14	22,68	10,56	6,33	15,28	32,17	17,65	

## ГЛАВА IV

# МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ И СОСТАВА ПОЧВЕННОГО ВОЗДУХА

Почвенный воздух отличается от атмосферного количественным и качественным составом.

Количество  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе при нормальной аэрации в десятки раз больше, чем в атмосферном.

Кислород в почве интенсивно поглощается корнями растений и микробами в процессе их дыхания. При отсутствии нормального газообмена в почвенном воздухе количество кислорода может падать до десятых долей процента, а углекислоты — увеличиваться до десяти и более объемных процентов.

Что касается  $\text{N}_2$ , то его незначительные количественные изменения связаны обычно с изменениями в содержании кислорода; при уменьшении последнего почвенный воздух относительно обогащается  $\text{N}_2$ .

Из всех газов наиболее легким является водород, он в 14,5 раза легче воздуха. Молекулы его движутся быстрее всех остальных газов. Он имеет наибольший коэффициент диффузии, вследствие этого концентрация его в поверхностных слоях почвы примерно такая же, как и в атмосфере.

В почвенной атмосфере содержится также аммиак, сероводород, метан и ряд газообразных летучих соединений, количественный и качественный состав которых еще не установлен.

### ФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЕННОГО ВОЗДУХА

По физическому состоянию почвенный воздух делят на свободный, сорбированный и растворенный.

**Свободный воздух** находится в почвенных крупных капиллярных и некапиллярных порах. Наибольшее значение для жизни

растений и почвенных процессов имеет воздух, находящийся в крупных некапиллярных порах. Эти поры обуславливают постоянную аэрацию почвы. Они бывают заполнены воздухом и при увлажнении почвы, соответствующем общей или полевой влагоемкости. Только при избыточном увлажнении некапиллярные поры заполняются водой. При подсыхании почвы от увлажненного до абсолютно сухого состояния количество воздуха непрерывно возрастает и в конце этого процесса почва из трехфазной системы: твердое тело + вода + воздух — превращается в двухфазную систему — твердая + газообразная фазы.

Воздух некапиллярных пор аэрации отличается наибольшей подвижностью и доступностью. Подвижность воздуха в капиллярных порах падает по мере уменьшения диаметра.

Защемленный воздух — часть свободного воздуха, находящегося в замкнутых порах, несообщающихся с атмосферой, растениями он используется на месте и имеет значение при технологической характеристике почвы, так как обуславливает частично ее упругие деформации. Объем защемленного воздуха в почве определяется по разности между общей скважностью и объемом пор занятых водой соответствующем величине водовместимости или полной влагоёмкости.

**Воздух, сорбированный почвой.** Сухие почвы обладают способностью в значительном количестве сорбировать (поглощать) газы, находящиеся в почве.

Поглощение газов почвою подразделяется на ряд процессов: а) адсорбция — сгущение газа на поверхности почвенных частиц (адсорбента); б) абсорбция — физико-химическое поглощение газов твердой и жидкой фазой почвы, с образованием в последнем случае растворов; в) хемосорбция — сорбция за счет химического взаимодействия между почвой и газом. Например, при действии  $H_2O + CO_2$  на  $CaCO_3$  получается  $Ca(HCO_3)_2$ . Сорбция газов и паров зависит, от их строения. Газы, имеющие полярное строение молекул, поглощаются тем энергичнее, чем выше их дипольный момент (полярные газы — аммиак, сероводород, водяной пар). В газах неполярного строения дипольный момент равен нулю, поэтому они адсорбируются почвой меньше. Сорбция газов пропорциональна их давлению и обратно пропорциональна температуре, кроме того, она зависит и от качества сорбента. Сорбция тем больше, чем выше дисперсность сорбента. Из всех составных частей почвы наибольшей поглотительной способностью газов обладают перегной и полуторные окислы, меньше эти свойства проявляются в кварце, извести и гипсе.

Сорбция газов почвою наблюдается при влажности меньше максимальной гигроскопической и наибольшего значения достигает в абсолютно сухих почвах.

**Растворенный почвенный воздух.** Разные компоненты почвенного воздуха имеют различную растворимость в воде. Наиболь-

шей растворимостью обладают аммиак, сероводород, углекислота (приложения, табл. 7).

Растворимость газов в воде возрастает с увеличением их парциального давления и с понижением температуры. Кроме того, в почвенной воде растворимость газов уменьшается с увеличением минерализации воды.

Газы в почвенном растворе существенно меняют свойства раствора. Так увеличение  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе и в связи с этим увеличение углекислоты в почвенном растворе способствует повышению растворимости карбонатов, фосфатов, гипса и других минеральных составных частей почвы.

Окислительно-восстановительные свойства почвенного раствора определяются растворенными в нем  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и другими газами и их соотношением. Так, дождевые воды и воды тающего снега в большом количестве содержат растворенный кислород, который придает окислительные свойства почвенному раствору. По мере движения раствора в глубь почвы кислород расходуется на дыхание почвенной фауны, корней растений и микробов, и почвенный раствор приобретает восстановительные свойства. В почвенном профиле выделяется окислительно-восстановительная граница, выше которой идут процессы окисления, ниже ее, глубже, в почвенной толще — процессы восстановления. Окислительно-восстановительные условия почвенного раствора оказывают большое влияние на почвенные процессы (минерализацию органического вещества, переход железа, марганца из окисных в закисные соединения и обратно, а также миграцию их в почвенной толще), на дисперсность и структуру почвы.

Большое влияние окислительно-восстановительные процессы оказывают на рост и развитие растений и жизнь микробов в почве. Значение окислительно-восстановительных свойств раствора особенно велико в почвах гидроморфного ряда и в условиях орошаемого земледелия.

Состав и состояние почвенного воздуха в значительной мере определяются физическим строением почвы.

### **ВОЗДУШНЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

Среди физических свойств почв следует выделить ряд характеристик, которые определяют количественный и качественный состав почвенного воздуха. Это — воздухоемкость, воздухопроницаемость и газообмен между почвой и атмосферой (аэрация почвы).

#### **Воздухоемкость**

Воздухоемкость — способность почвы удерживать при определенном физическом состоянии то или иное количество воздуха. Содержание воздуха при этом выражают в процентах от объема

почвы. Воздухоёмкость — величина динамичная. При полном насыщении всех пор в почве водой присутствует только растворенный воздух. По мере подсыхания почвы количество воздуха в почве возрастает. Воздухоёмкость при влажности почвы, соответствующей общей или полевой влагоемкости, является существенной физической характеристикой. Величина ее равна разности между общим объемом пор и объемом пор, занятых водой при общей влагоемкости. Если объем пор, занятых воздухом, при общей влагоемкости меньше 10—15% от объема почвы, то аэрация почвы будет недостаточной, потребуются мелиоративные или агротехнические приемы для улучшения аэрации. Максимальная воздухоёмкость в почве наблюдается в абсолютно сухом состоянии, когда величина ее складывается из адсорбированного воздуха и свободного, заполняющего все поры почвы.

**Методы определения воздухоёмкости почвы.** Объем, занимаемый в почве воздухом, определяется буровым методом (Дояренко, 1926, Качинский, 1945) или измеряется с помощью специального аэропикнометра (Пейдж, 1948, Рассел, 1950).

**Буровой метод.** Цилиндром определенного объема берут образец почвы, определяют вес сырой почвы, влажность  $W$  для вычисления веса сухой почвы, объемный вес ( $d_v$ ), а также удельный вес твердой фазы почвы  $d$ , если он неизвестен. Отношение веса сухой почвы к ее объему в цилиндре дает удельный вес скелета почвы  $d_v$ , затем по уравнению

$$\frac{d - d_v}{d} \cdot 100 = P_{\text{общ}} \%$$

определяют общую порозность почвы в процентах к ее объему.

Вычисляют объем пор, занятых водой

$$P_w = W \% \cdot d_v \quad (32)$$

и воздухом

$$P_{\text{азр.}} = P_{\text{общ.}} - P_w$$

(подробно см. гл. III).

Быстрее и проще вытеснить воздух из данного объема почвы путем отсасывания насосом или вытеснения жидкостью, не растворяющей почвенный воздух (насыщенный раствор NaCl, ртуть и т. п.) В таком случае отпадает необходимость определять влажность и удельный вес твердой фазы почвы. Количество воздуха в газоприемнике определяют непосредственно. Подробно методика описана на стр. 148—149.

**Аэропикнометрический метод.** Для определения объема воздуха в почве берут буром образец почвы известного объема и помещают в воздухонепроницаемую систему, состоящую из камеры для почвы, манометра для измерения давления воздуха и особого приспособления для изменения объема камеры прибора. Измеряют первоначальное давление  $P_0$  в приборе, объем камеры прибора для почвы —  $V_0$  и объем образца почвы —  $V_n$ . Затем

уменьшают объем камеры в системе на величину  $\Delta V$  и измеряют изменившееся давление  $P_1$ .

При постоянной температуре опыта

$$P_0 V_0 = P_1 V_1, \quad (33)$$

где  $V_1$  — измененный объем камеры. Объем камеры  $V_k$  занимает частью образец почвы —  $V_n$  с включенным в него объемом почвенного воздуха —  $V_g$ . Объем воздуха в камере —  $V_0$  представляет собою алгебраическую сумму

$$V_k - V_n + V_g \text{ или } V_k - V_n + \frac{x \cdot V_n}{100},$$

где  $x$  — процентное содержание воздуха в почве. При загрузке камеры почвой, когда измеренное манометром давление равно  $P_0$ , левая часть уравнения может быть выражена через

$$P_0 \left( V_k - V_n + \frac{x \cdot V_n}{100} \right).$$

После изменения свободного объема камеры на  $\Delta V$ ,  $V_1$  будет равен

$$V_k - V_n + \frac{x \cdot V_n}{100} - \Delta V$$

и тогда правая часть уравнения может быть записана:

$$P_1 \left( V_k - V_n + \frac{x \cdot V_n}{100} - \Delta V \right).$$

После подстановки названных значений уравнение примет вид:

$$P_0 \left( V_k - V_n + \frac{x \cdot V_n}{100} \right) = P_1 \left( V_k - V_n + \frac{x \cdot V_n}{100} - \Delta V \right),$$

откуда

$$x = 100 \left[ 1 - \frac{V_k}{V_n} + \frac{\Delta V}{V_n} \cdot \frac{P}{P_1 - P_0} \right]. \quad (34)$$

Для данного аэропикнометра величины  $V_k$  и  $V_n$  — постоянные.

Для удобства вычисления строят калибровочную кривую изменения  $P_1$  в зависимости от  $x$ .

Если атмосферное давление  $P_0$  мало изменяется (при небольших колебаниях берется среднее значение его), то можно построить одну калибровочную кривую; в противном случае строится отдельно кривая для каждого встречающегося значения  $P_0$ .

Имеется несколько приборов, в которых используется описанный принцип. Ниже приводится описание аэропикнометра Расселя как наиболее простого и совершенного.

Прибор Расселя (рис. 34) состоит из цилиндрической латунной камеры для почвы, имеющей снимающуюся нижнюю крышку, которая позволяет легко помещать и удалять образец почвы. К этой камере присоединяется сильфон (металлические меха) и ртутный манометр. С помощью винта сильфоном уменьшают объем камеры на величину  $\Delta V$ . Далее анализ ведут вышеописанным образом.

санным способом. Объем воздуха в пробе определяют по калибровочной кривой или по формуле 34. В приборе автора общий объем камеры составляет  $123 \text{ см}^3$ , наибольшее возможное уменьшение объема составляет  $17 \text{ см}^3$ , максимальный объем почвенного образца  $71 \text{ см}^3$ .

Объем камеры ( $V_k$ ) прибора, если он неизвестен, измеряют с помощью металлической болванки определенного объема  $V_0$ , которую помещают внутри камеры прибора, при этом измеряют  $P_0$ . Затем сифоном изменяют объем на  $\Delta V$  и вновь измеряют давление  $P_1$ , по уравнению

$$P_0 (V_k - V_0) = P_1 [(V_k - V_0) - \Delta V] \quad (35)$$

вычисляют  $V_k$ . Этой болванкой можно воспользоваться и при составлении калибровочных кривых.

Прибор отличается небольшой чувствительностью при низких значениях  $X$ . Чувствительность прибора может быть увеличена путем увеличения  $\Delta V$  или объема почвенного образца.

Автор провел определение аэрации этим прибором в полевых условиях на участках с различной обработкой почвы. При этом полученные данные по аэрации почв были показательны для оценки различных видов вспашки почвы.

**Выделение и учет адсорбированного воздуха.** Количество воздуха или газа, поглощенного сухой почвой, выраженное в  $\text{мг}$  или  $\text{мл}$  на  $100 \text{ г}$  адсорбента, называют адсорбционной емкостью почвы. Определение этой величины имеет большое практическое значение.

Величина емкости поглощения почвою газов может быть использована как физическая характеристика почвы, указывающая на степень дисперсности почвы и на величину емкости поглощения катионов. По данным Чапека (1930), коэффициент корреляции между этими величинами имеет значение  $0,8 - 0,9$ .

Поглощенный воздух в сухой почве при быстром ее увлажнении (орошение, сильный дождь) сжимается и вытесняется водой. Сжимаясь, он развивает большую динамическую силу, способствующую разрушению почвенной структуры. Величина газовой емкости поглощения почвы имеет значение и при внесении в почву газообразных удобрений и отравляющих газов, применяемых в сельском хозяйстве и обороне.

Во 2-й половине XIX в. изучению адсорбции почвой газов было уделено большое внимание. Многие исследователи для

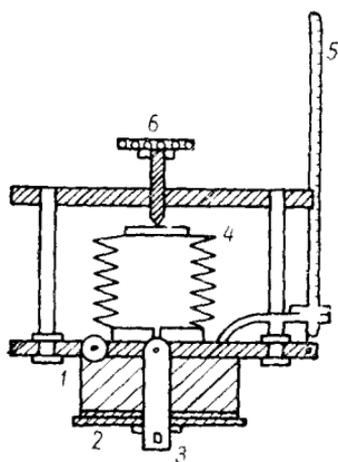


Рис. 34. Схема аэропикнометра Рассела:

1 — латунный цилиндр для почвы, 2 — крышка, 3 — крепление прибора, 4 — сифон, 5 — манометр, 6 — винт

определения поглощенного газа или воздуха пользовались методом, предложенным Рихардом и Блюм-риттом (1865). Исследуемое вещество с поглощенным газом помещали в стеклянную реторту, соединенную с эвдиометром, установленным над ртутью. Образец нагревали до  $140^{\circ}$ , выделяющийся при этом газ собирали и измеряли в градуированном эвдиометре.

Метод Аммона (1879). Для удаления воздуха образец почвы сушили при  $110^{\circ}$ , затем охлаждали между притертыми часовыми стеклами и помещали в специальную трубку, через которую пропускали тот или иной газ. По привесу взятой навески определяли количество поглощенного газа. Зная удельный вес взятого вещества и адсорбированного газа, производили расчет не только в весовых процентах, но и в объемных единицах.

Метод Добенека (1892). По этому методу почву высушивали в V-образных трубках с шлифованными краями, которые при охлаждении почвы закрывались. После охлаждения через трубку пропускали газ. По привесу трубки устанавливали количество поглощенного вещества.

В дальнейшем Чигарев (1935) и Антипов-Каратаев усовершенствовали этот метод<sup>1</sup>.

Более перспективным представляется метод Ф. Соболева (1930), который основан на вытеснении адсорбированного воздуха водой и учете объема выделившегося газа. Предложенный автором прибор представлен на рис. 35. Он состоит из бюретки для воды (1), соединенной со стеклянной трубкой для почвы (2); в нижнюю часть трубки с почвой вставляется металлическая сетка. Трубку с почвой помещают в термостат (3), в крышку которого вставлен термометр (4). С помощью каучуковой трубки сосуд с почвой соединяется с эвдиометром через кран (6). Эвдиометр состоит из бюретки на 25 мл, соединенной тройником с трубкой такой же высоты и диаметра и стеклянной грушей для приведения давления воздуха в эвдиометре к атмосферному. Эвдиометр вмонтирован в термостат. Во время опыта в сосуде с почвой и в эвдиометре поддерживают постоянную температуру.

*Ход определения:* навеску почвы — 25 г высушивают до постоянного веса при  $100-105^{\circ}\text{C}$ , после чего еще горячую почву переносят в нагретую до  $100^{\circ}$  трубку прибора. Нижний конец трубки закрывают каучуком со стеклянной палочкой, а верхний конец (через стеклянную трубку) присоединяют к трубке с хлористым кальцием. В таком виде почву охлаждают на воздухе, затем определяют количество поглощенного воздуха. Для этого трубку с почвой помещают в ванну с водой определенной температуры,

<sup>1</sup> Описание см. в книге «Современные методы исследования физико-химических свойств почвы» Вып. 3, т. IV, АН СССР, 1948.

присоединяют к эвдиометру, в котором с помощью груши устанавливают давление, равное атмосферному, и делают отсчет по бюретке и эвдиометру. После этого медленным током из бюретки выпускают воду в трубку с почвой до тех пор, пока вода появится на поверхности почвы. Через 5—10 мин снова давление в эвдиометре доводят до атмосферного и делают отсчет. Уровень воды в эвдиометре снизится на большую величину, чем в бюретке. Разница в отсчетах по эвдиометру и бюретке перед опытом

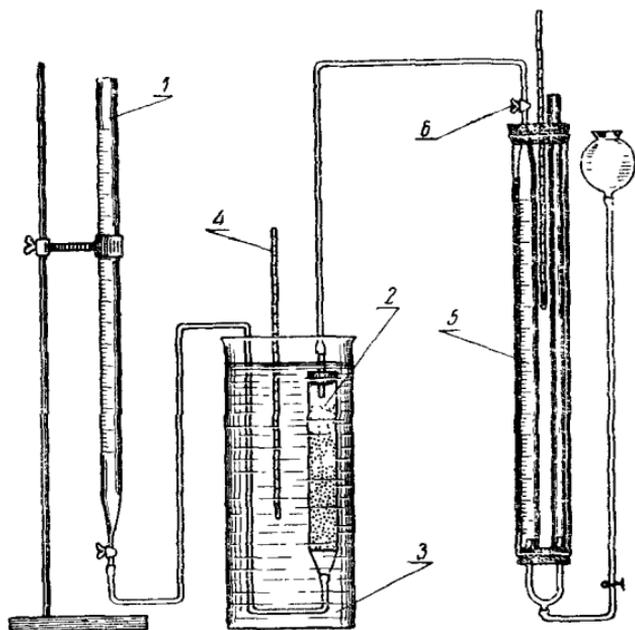


Рис. 35. Схема установки для определения сорбированного воздуха по Соболеву:

1 — бюретка для воды, 2 — стеклянная трубка для почвы, 3 — термостат, 4 — термометр, 5 — эвдиометр, 6 — кран, 7 — стеклянная груша

и после опыта дает объем вытесненного адсорбированного воздуха. Этот объем приводят к нормальным условиям, пользуясь таблицей (см. приложения — табл. 3), к температуре  $0^{\circ}$  и давлению 760 мм, рассчитывают на 100 г сухой почвы. Выделенный адсорбированный воздух анализируют в газоанализаторе способом, описанным ниже.

Анализ адсорбированного воздуха простой и нетрудоемкий. Необходимо только заменить воду насыщенным раствором NaCl, в котором растворимость газов значительно меньше, чем в воде.

Для определения емкости поглощения почвы в отношении к различным газам ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  и т. д.) абсолютно сухую и нагретую до  $100^{\circ}$  почву присоединяют к установке с данным газом и при охлаждении в его атмосфере насыщают им почву до постоянного веса, после чего вышеописанным способом определяют объем поглощенного газа.

## Воздухопроницаемость почвы

Скорость проникновения воздуха или газа в почвенную толщу называют воздухопроницаемостью. В природных условиях проникновение воздуха или газа в почву происходит под влиянием атмосферного давления или воды, затопляющей поверхность почвы в период снеготаяния, ливневых дождей и т. п.

За меру воздухопроницаемости почвы принимается количество воздуха в мл, прошедшего в единицу времени, через площадь сечения почвы  $1 \text{ см}^2$ , при толщине слоя в  $1 \text{ см}$  под опреде-

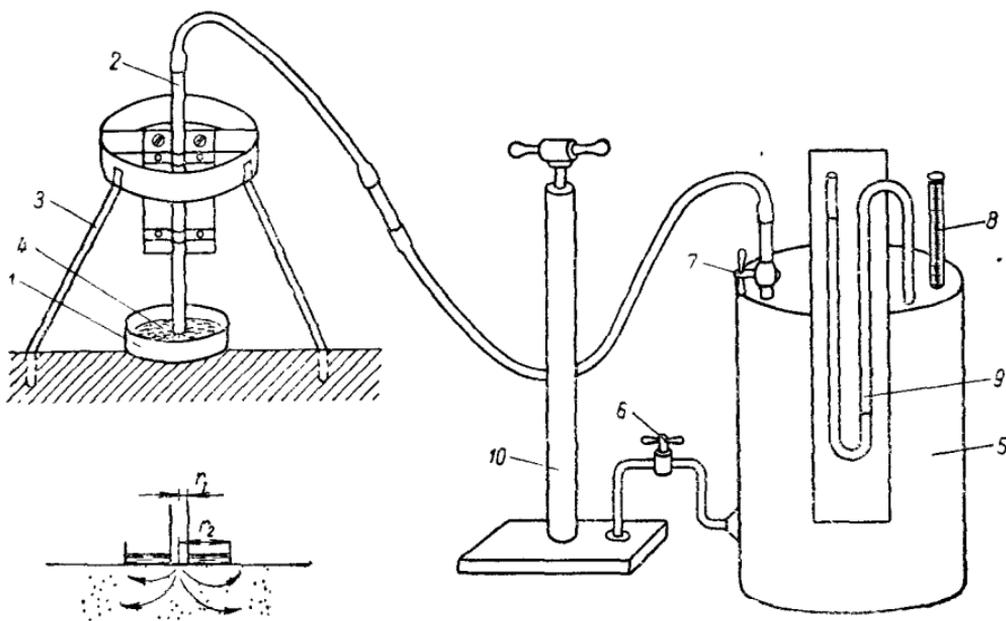


Рис. 36. Схема прибора Эванса и Кирхама:

1 — кольцо, 2 — стеклянная трубка, 3 — тренога, 4 — парафин, 5 — сосуд, 6, 7 — краны, 8 — термометр, 9 — манометр, 10 — ручной автомобильный насос

ленным давлением. Выражают ее в относительных величинах — в процентах к скорости движения воздуха в атмосферу.

Для измерения воздухопроницаемости применяют несколько методов. Приводим описание некоторых из них.

Манометрический метод основан на учете времени ( $t_1$ ) выравнивания градиента давления в сосуде, соединенном последовательно с почвой и атмосферой.

Ниже приводится описание метода и схемы прибора Эванса и Кирхама для измерения воздухопроницаемости поверхности почвы (рис. 36).

В поверхность почвы врезают металлическое кольцо (1), в центр которого вставлена стеклянная или из прозрачной пластмассы трубка (2), касающаяся поверхности почвы. Трубка укрепена на треноге (3). Поверхность почвы внутри кольца

заливают парафином. В сосуд (5) автомобильным насосом накачивают воздух до тех пор, пока столб воды в манометрической трубке поднимется до отметки 30—40 см. Затем кран (6) на трубке, через которую поступал воздух, закрывают, открывают кран (7). Воздух из сосуда (5) через шланг и трубку поступает в почву; давление в сосуде падает. Учитывают время выравнивания давления в сосуде с атмосферным через почву —  $t_1$  и затем опять так же накачивают воздух в сосуд (5) и выпускают его в атмосферу —  $t_2$ . Коэффициент воздухопроницаемости

$$K_g \% = \frac{t_1}{t_2} \cdot 100. \quad (36)$$

Авторы предлагают формулу для вычисления воздухопроницаемости  $K_g$  в единицах дарси. Дарси — число *мл* газа, протекающее в секунду (нормально к поверхности пористой среды) через  $1 \text{ см}^2$  при вязкости воздуха = 1,01 пуазы, и градиенте давления в  $1 \text{ атм}$  на  $1 \text{ см}^2$ :

$$K_g = \frac{2,30 \eta V}{A P_a t} \lg \frac{I_0}{I_1}, \quad (37)$$

где  $\eta$  — вязкость в пуазах,  $V$  — объем сосуда,  $A$  — отношение радиуса трубки —  $r$  к радиусу кольца  $r_2$ ,  $P_a$  — атмосферное давление,  $I_0$  — высота столба воды в манометре перед опытом,  $I_1$  — то же после опыта.

Проведенные определения в поле показали, что воздухопроницаемость поверхности почвы изменяется от десятых долей до 40 целых единиц дарси и зависит от влажности почвы и ее культурного состояния.

Прибором можно определить воздухопроницаемость по генетическим горизонтам, соответственно обнажая их, а также в образцах почвы нарушенного или естественного сложения, которые для этих целей следует брать в специальные цилиндры.

Реометрический метод. В основу метода положено непосредственное измерение скорости прохождения воздуха через почву с помощью реометра. Реометр имеет дросселирующее устройство, состоящее из трубки с переменным диаметром по длине. При переходе газа из широкой части трубки в узкую скорость потока газа увеличивается, а давление падает. Перепад давления измеряется манометром. Количество протекающего через реометр газа подчиняется уравнению Бернулли, пользуясь которым можно вычислить объем газа, протекающего через реометр. Практически реометр градуируют с помощью газовых часов или аспиратора — моностата (Еремина, 1955).

Реометрический метод определения воздухопроницаемости почвы разработан Добряковым (1937, 1952). Прибор, предложенный им, при изготовлении в лаборатории физики почв МГУ значительно изменен. Дана другая форма сосудов для подачи воды, стекло заменено пластмассой, что увеличивает прочность прибора, изготовлен специальный портативный футляр.

Прибор в этой модификации показан на рис. 37. Из крана по шлангу воду подают в регулятор давления воды (1), излишек воды сливают в раковину через отводную трубку (2); из регулятора давления воду подают в сосуд (3) — регулятор скорости. Передвигая его с помощью винта (4) вверх или вниз, можно добиться любой скорости движения воздуха в аппарате. При уста-

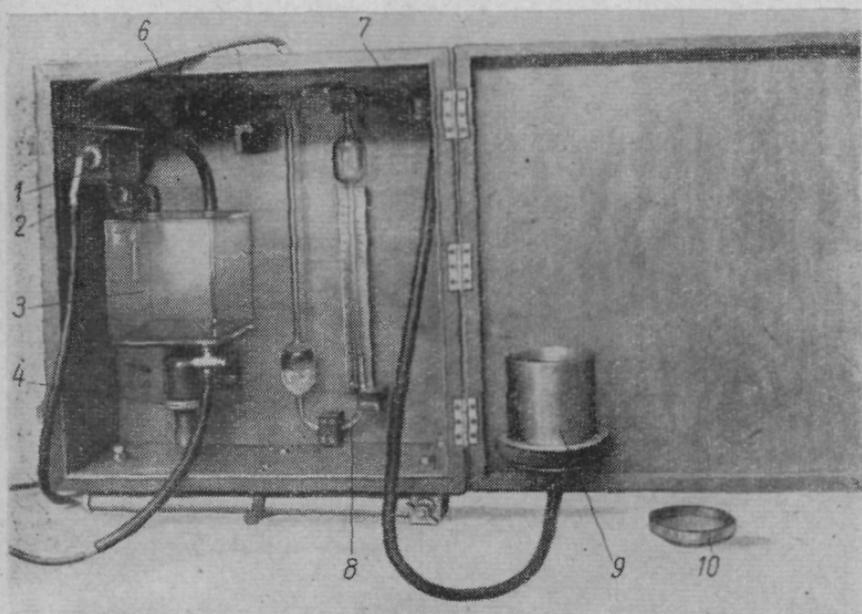


Рис. 37. Реометрический прибор для определения воздухопроницаемости почвы:

1 — регулятор давления воды, 2 — отводная трубка, 3 — сосуд-регулятор скорости, 4 — винт, 5 — кран для слива воды, 6, 7 — краны, 8 — реометр, 9 — цилиндр с почвой, 10 — крышка цилиндра

новке аппарата трехходовым краном (6) ток воздуха направляют в атмосферу через реометр (8). Уровень жидкости в реометре по шкале указывает на скорость движения воздуха. При этом следует иметь в виду, что цифры на шкале реометра означают скорость прохождения воздуха через аппарат — в *мл/мин.*

С помощью регулятора (3), при установке реометра (8) на атмосферу, добиваются, чтобы мениск правой шкалы реометра стоял на делении *100 мл/мин.* Затем поворотом крана (7) присоединяют реометр к цилиндру с почвой (9). Так как почва оказывает сопротивление току воздуха, то скорость движения воздуха снизится, соответственно изменится и показание реометра. Отсчет по его шкале даст воздухопроницаемость почвы в процентах по отношению к движению его в атмосферу. Цилиндр для почвы изготовляют объемом *500 мл.* Его привинчивают к крышке (10), в центре которой имеется металлическая трубка,

на которую надевается каучуковая, соединяющая почвенный цилиндр с реометром.

Почву в цилиндр берут нарушенного или естественного строения. Определение можно вести в поле, погружая цилиндр в почву. Тогда крышку 10 надевают сверху, и воздух входит в почвенную толщу. При размещении цилиндров в разных горизонтах дают характеристику воздухопроницаемости почвы по профилю. При работе с прибором следует тщательно следить за герметичностью соединений. Место контакта цилиндра с крышкой промазать вакуумной мазью, если имеется щель между цилиндром и почвой — залить ее расплавленным парафином. Определение воздухопроницаемости повторяют от 3 до 5 раз.

Добряков (1952 г.) на основании изучения динамики воздухопроницаемости почвы в естественном состоянии после максимального увлажнения (добавляя 20 мм воды в верхнюю часть цилиндра с почвой) установил, что почвы структурные через 60 мин после увлажнения восстанавливают свою воздухопроницаемость, бесструктурные — резко снижают воздухопроницаемость и не восстанавливают ее в течение часа. На основании этого им даны классификации почв по структурному состоянию.

Таблица 25

**Классификация почв по структурному состоянию**

Структурное состояние почвы	Величина воздухопроницаемости в мл/мин, наблюдаемая через 60 мин после увлажнения почвы
Хорошо структурное .	60
Средне » .	40—60
Слабо » .	20—40
Бесструктурное . . . .	0—20

Этим методом хорошо улавливаются изменения в структуре дерново-подзолистых почв под влиянием известкования и травосеяния, в то время как методы структурного анализа — Саввина, Виленского (по данным автора) — слабо отражают происшедшие при этом изменения в структуре почв.

**Газообмен между почвой и атмосферой (аэрация)**

Главными факторами газообмена между почвой и атмосферой являются диффузия, изменение температуры почвы в течение суток, изменение барометрического давления, вытеснение воздуха из почвы при выпадении осадков или при орошении, а также ветер, который при рыхлой поверхности почвы может выдувать из поверхностного слоя воздух, заменяя его новым. Значение этих факторов не однозначно.

Роммель (1922) считает главным постоянно действующим фактором газообмена диффузию газов; А. Г. Дояренко (1926) — изменение температуры почвы в течение суток — «дыхание» ее.

По данным Дояренко, при средней скважности почвы и обычной суточной амплитуде колебания температуры за счет «дыхания» обменивается на атмосферный воздух 10—12% почвенного воздуха (от общего содержания его), что вполне удовлетворяет суточную потребность растений в кислороде.

Периодически может сильно возрасти роль других факторов газообмена. Интенсивность

аэрации определяет и наличие свободных, незаполненных водой пор в почве. Если объем пор суглинистых почв, через которые совершается газообмен, меньше 10% объема почвы, то интенсивность аэрации недостаточная для нормального развития растений, удовлетворительная при 10—15% и хорошая при 15—25% (по данным Копецкого (1914), Дояренко (1924), Уоде-ра (1937), Качинского (1947)).

Структурная почва обеспечивает нормальное соотношение пор, занятых водой и воздухом.

Интенсивность газообмена между почвой и атмосферой определяют косвенно, по количеству выделившейся из почвы  $\text{CO}_2$  или другого газа и непосредственно — путем измерения количества проникшего и выделившегося из почвы воздуха — «дыханием» почвы, и по величине диффузии одного какого-нибудь компонента почвенного воздуха.

Определение  $\text{CO}_2$  в приземном слое воздуха. Для этой цели можно использовать воронку Люндегорда (1924, рис. 38), диаметром 30—40 см. Края ее переходят в цилиндрические плечики высотой 10 см. Воронку врезают в поверхность почвы на глубину плечек. Увлажненную почву вокруг воронки утрамбовывают для изоляции от атмосферного воздуха. При взятии пробы воздуха одно отверстие воронки (1) закрывают, другое (2) через каучуковую трубку соединяют с газовой пипеткой, в которую берут пробу почвенного воздуха. После взятия пробы открывают второе отверстие для выравнивания давления под колпаком. Первую порцию воздуха, заполняющего воронку, следует удалить и затем брать пробу для анализа, в которой с помощью титрованного раствора  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  или на газоанализаторе определяют  $\text{CO}_2$ . Пробу берут через час.

Берут также пробу атмосферного воздуха и в ней определяют

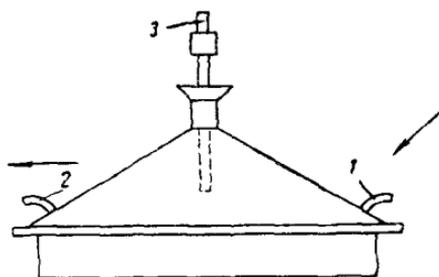


Рис. 38. Воронка Люндегорда:  
1, 2 — выводные отверстия, 3 — отверстие для термометра

CO<sub>2</sub>. Количество выделившейся из почвы CO<sub>2</sub> вычисляют по разнице между первым и вторым определением и пересчитывают в кг/га в один час.

Макаров (1952) сконструировал специальный домик для изучения газообмена по выделяющейся из почвы CO<sub>2</sub>.

Перед началом определения срезают, в целях устранения влияния ассимиляционного процесса на содержание CO<sub>2</sub>, надземные части растений.

Стекланный домик Макарова размером 30×60×50 см ставят на поверхность почвы и врезают его на 3—5 см в почву. Землю вокруг домика увлажняют и уплотняют. Через 30 мин после установки из домика аспиратором берут пробу воздуха — 2 л со скоростью 0,5 л в минуту.

Для определения CO<sub>2</sub> воздух пропускают с помощью аспиратора через титрованный раствор Ва (ОН)<sub>2</sub>. По разности конечной и начальной концентрации CO<sub>2</sub> определяют количество выделившейся CO<sub>2</sub> с данной поверхности почвы за 30 мин. Затем производят расчет выделившейся CO<sub>2</sub> за один час в кг/га. Разница температуры воздуха внутри домика по сравнению с наружным воздухом к концу определения достигает 1—3°, под железным колпаком она значительно больше, поэтому целесообразнее применять стеклянные воронки или домики.

По данным Макарова, количество выделившейся с поверхности почвы CO<sub>2</sub> зависит от температуры.

Кроме того, интенсивность выделения CO<sub>2</sub> из почвы зависит от типа и разности почвы и характера растительного покрова. Эти обстоятельства надо учитывать при изучении газообмена между почвой и атмосферой.

Определение «дыхания» почвы. Для определения количества воздуха, вошедшего в почву и выделившегося из нее за тот или иной промежуток времени, вследствие изменения температуры употребляют приборы — Дояренко (1926), Трофимова и др.

Чаще всего в лабораторной практике применяется прибор Трофимова.

В лаборатории физики почв МГУ при изготовлении этого прибора сделаны некоторые изменения: сосуд для воды имеет форму прямоугольного параллелепипеда, изготовленного из прозрачной пластмассы, а не из стекла, из пластмассы изготовлены и пробирки. Кроме того, сделаны специальные гнезда для пробирок и портативный футляр. Прибор (рис. 39) имеет следующее устройство: сосуд для воды (1) высотой 4 см, шириной 5 и длиной 12 см. Объем сосуда соответствует 240 мл. В верхней части его имеется отверстие для наполнения сосуда водой (2), оно герметически закрывается винтом.

В дне сосуда проделаны два отверстия (3) диаметром около 5 мм на расстоянии 5 см друг от друга, в которые герметически вделаны трубки (4). Полости трубок заканчиваются книзу кону-

сом с выходным отверстием, диаметр которого равен 0,5 мм. Концы трубок герметически соединены с градуированными пробирками (5) емкостью в 10 мл. Пробирки имеют боковые полые трубочки, загнутые книзу. Правая пробирка с помощью трубочки соединяется с цилиндром для почвы (6), левая — с атмосферой. Цилиндр для почвы — металлический, емкостью около литра

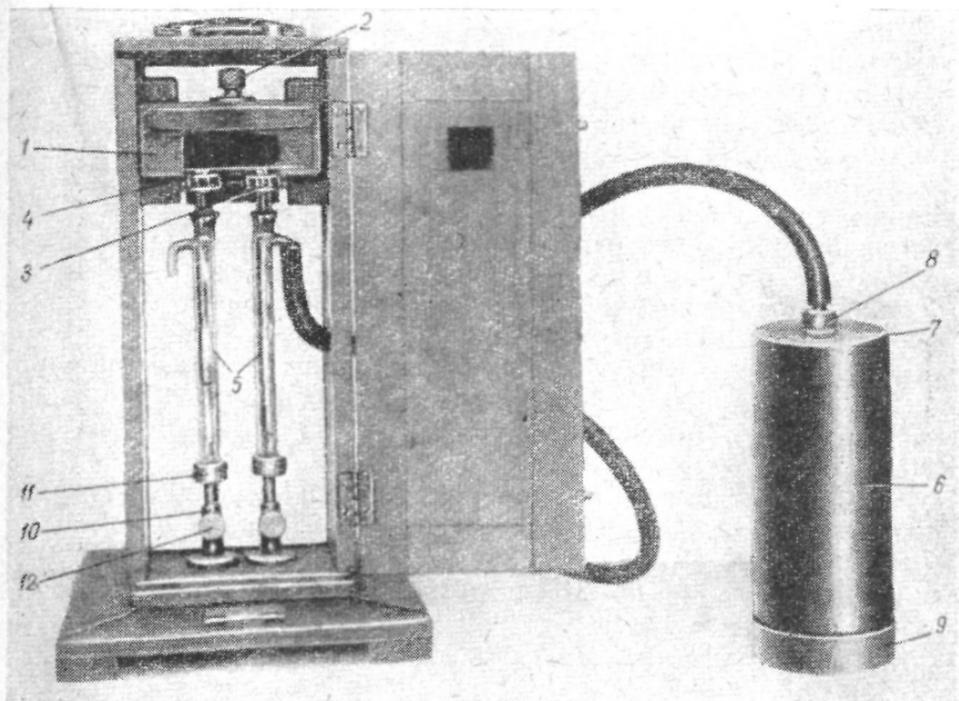


Рис. 39. Прибор для измерения «дыхания» почвы:

1 — сосуд для воды, 2 — верхнее отверстие сосуда, 3 — пробки с капиллярными отверстиями, 4 — отверстия в дне сосуда, 5 — градуированные пробирки, 6 — цилиндр для почвы, 7 — верхняя крышка цилиндра, 8 — отверстие в верхней крышке цилиндра, 9 — отъемная крышка нижнего конца цилиндра, 10 — полые металлические трубки, 11 — башмачки для пробирки, 12 — боковой винт

(высота 19 — 20 см и  $d$  — 8 см). Нижняя режущая часть цилиндра заострена. Для уменьшения деформации почвы при взятии пробы диаметр режущей части делается на 0,5 — 1 мм меньше, чем остальной части цилиндра. Верхний конец цилиндра имеет крышку (7), в центре которой находится отверстие (8) в виде металлической трубки диаметром около 1 см, с винтовой резьбой на внешней стороне, на которую навинчивают колпачок с вакуумной каучуковой трубкой, соединяющий цилиндр с пробиркой. После взятия почвенного образца нижний конец цилиндра плотно закрывают отъемной крышкой (9). Прибор вмонтирован в футляр. В верхней части футляра имеется гнездо, обтянутое сукном, для сосуда с водой. Для установки пробирок на дне фут-

ляра шурупамы закреплены полые металлические трубки (10) высотой до 4 см. В эти трубки вставляют пружины, на которые ставят «башмачки» для пробирок в форме цилиндрического гнезда с ножкой. «Ножку» вставляют в трубку на пружинку, благодаря которой пробирка плотно прижимается к шлифу, после чего положение их фиксируется боковым винтом (12).

Прибор удобен для определения газообмена в поле и в лаборатории.

При определении в поле металлический цилиндр погружают в почву на изучаемую глубину. При нагревании почвы в первой половине дня воздух в почве расширяется, входит через правую пробирку в сосуд с водой, вытесняя соответствующий объем воды в левую пробирку; во второй половине дня и ночью почва охлаждается, воздух в ней сжимается и в правую пробирку из баллона с водой втягивается соответствующий объем воды, а из левой пробирки в баллон на место ушедшей воды входит воздух. О масштабе суточного газообмена судят по количеству воды в той или другой пробирке.

В лаборатории взятую в цилиндр пробу почвы приводят к температуре лаборатории. Затем, помещая цилиндр с почвой в нагретый песок или воду при герметически закрытом дне, повышают температуру почвы на  $10^{\circ}$  и делают отсчет.

Объем выделившегося воздуха вычисляют в процентах к объему пор, не занятых водой. Пусть за день выделилось 5 мл воздуха из литра почвы. Сквозность почвы взятого образца была 50%; влажность его — 25% по объему. Тогда объем воздуха во взятом образце почвы будет составлять  $50 - 25 = 25\%$ , или 250 мл. Газообмен  $D_2\% = \frac{5 \cdot 100}{250} = 2\%$  от общего количества воздуха в образце.

Газообмен можно рассчитать на единицу поверхности почвы:

$$D_2 = \frac{V_g}{S}, \quad (38)$$

где  $V_g$  — объем выделившегося воздуха,  $S$  — площадь почвы, через которую идет газообмен  $D_2 = \frac{5 \text{ мл}}{50 \text{ см}}$  (где 50 — площадь цилиндра) или  $0,1 \text{ мл/см}^2 \cdot 10^8 = 10000 \text{ L/га}$ .

Контроль определения двойной, лучше тройной.

**Д и ф ф у з и о н н ы й г а з о о б м е н.** Обычной или концентрационной диффузией называют процесс перемещения компонентов газовой смеси в направлении от большей к меньшей концентрации. Количество вещества —  $Q$ , переносимого диффузионным потоком, подчиняется первому закону Фика

$$Q = -DSt \frac{dc}{dx}, \quad (39)$$

где минус означает перенос вещества в сторону убывающей концентрации;

$D$  — коэффициент диффузии, равный количеству вещества, диффундирующего через слой площадью в  $1 \text{ см}^2$  и толщиной в  $1 \text{ см}$ , за время  $t = 1 \text{ сек}$ , при  $\frac{dc}{dx} = 1$ . В абсолютной системе единиц размерность  $D$  —  $\text{см}^2/\text{сек}$ .

$\frac{dc}{dx}$  — градиент концентрации — вдоль направления диффузионного потока —  $x$ .

$S$  — площадь сечения.

Коэффициент  $D$  определяют из уравнения

$$D = \frac{Q}{St \frac{dc}{dx}}. \quad (40)$$

На основании уравнения (40) при постоянном значении  $D$  выводится второй закон Фика

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial t}, \quad (41)$$

который тоже используется при изучении диффузии. Следует иметь в виду, что перенос вещества может быть обусловлен неоднородной температурой в слое диффузионной колонны. В таком случае будет идти процесс термодиффузии. Кроме температуры, на процесс диффузии оказывает влияние атмосферное давление, что нужно иметь в виду при изучении диффузии.

Коэффициент диффузии газа в атмосферу —  $D_0$  определяют непосредственно на приборе по изучению диффузии или значение его берут из соответствующих справочников физических и химических величин.

Таблица 26

Величина  $D_0$  (коэффициент диффузии) для системы газ—воздух (при температуре  $t = 0^\circ$  и давлении  $P = 760 \text{ мм рт. ст.}$ )

Система	$D_0 \text{ см}^2/\text{сек}$
Кислород ( $\text{O}_2$ ) — воздух .	0,178
Водород ( $\text{H}_2$ ) — воздух . .	0,634
Углекислота ( $\text{CO}_2$ ) — воздух	0,138
Аммиак ( $\text{NH}_3$ ) — воздух .	0,198
Пары воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ) — воздух	0,198

Скорость диффузии  $V_D$  часто выражают через относительный коэффициент диффузии

$$\frac{D}{D_0} = V_D. \quad (42)$$

Методике изучения диффузии газов через почву посвящены работы: Букингама, 1904; Вершинина и Кирилленко, 1948; Тейлора, 1950; Ранея, 1950; Поясова, 1958, и др.

Для измерения величины  $D$  применяют кинетический метод, основанный на определении изменения концентрации диффундирующего вещества со временем в диффузиометре.

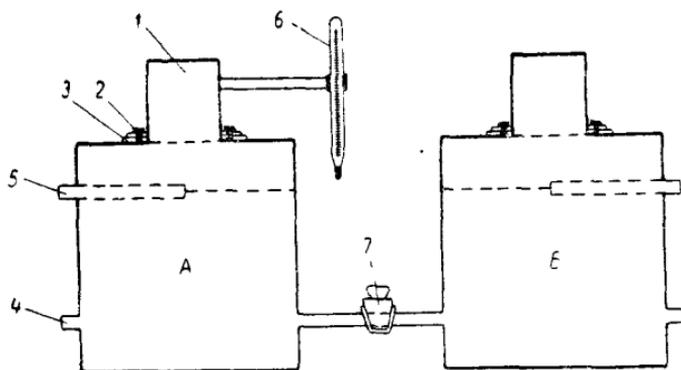


Рис. 40. Прибор для измерения диффузии газа в почве:

А и Б — диффузионные камеры, 1 — металлический цилиндр с почвой, 2 — болты, 3 — прокладка из мягкой резины, 4, 5 — вводные трубки, 6 — термометр, 7 — кран

*Измерение диффузии газа по изменению концентрации.* Главные части установок для определения диффузии — диффузионная камера, куда помещается диффундирующий газ, колонка почвы и газоанализатор.

На рис. 40 дана схема установки Агрофизического института по типу Тейлора. Она проста и доступна. Диффузионная камера А имеет объем 10—13 л. В нее вводится газ, диффундирующий через почву в атмосферу. В камере имеются две выводные трубки: (4) для ввода газа и (5) — для взятия пробы газа на анализ.

Почву ненарушенного или нарушенного строения берут в металлический цилиндр (1) емкостью 300 мл, с площадью основания 30 см<sup>2</sup> и высотой 10 см. На дно цилиндра туго натягивают сетку с отверстиями 0,5 мм. Цилиндр с почвой (1) закрепляют болтами (2) над вырезом прибора. Для герметичности в месте скрепления цилиндра с диффузиометром даны прокладки из мягкой резины (3). К цилиндру с почвой прикреплен термометр (6), регистрирующий температуру среды во время опыта. Работу ведут одновременно на двух установках (А и Б), соединенных между собой краном (7).

После загрузки почвы в сосуды (А) и (Б) вводят газ, например, по 3 л СО<sub>2</sub>, и оставляют на 14—16 час для выравнивания концентрации и установления регулярного режима диффузии СО<sub>2</sub> в атмосферу, когда изменение концентрации во времени происходит экспоненциально. Затем берут пробу газа через

трубку (5) для определения концентрации, отмечают время  $t$  и температуру  $t^\circ$ . При взятии пробы цилиндр с почвой закрывают резиновым колпачком.

Концентрацию —  $C$  в процентах объема  $\text{CO}_2$  определяют на любом газоанализаторе, например ВТИ (стр. 152), перед опытом ( $C_n$  — начальная) и через время  $t$  ( $C_k$  — конечная).

Количество продиффундировавшей  $\text{CO}_2$  —  $Q$  — вычисляют по формуле

$$Q = \frac{(C_n - C_k)}{100} V, \quad (43)$$

где  $V$  — объем диффузионной камеры.

Пример (для вычисления величины  $D$  по формуле 40):

$$D = \frac{Q}{St \frac{dc}{dx}}$$

Объем диффузионной камеры  $V = 10000 \text{ см}^3$ ;  $C_n = 25\%$ ;  $C_k = 15\%$ . Для вычисления градиента устанавливают среднюю концентрацию  $\text{CO}_2$  за время опыта

$$C_{cp} = \frac{25\% + 15\%}{2} = 20\%,$$

допуская, что изменение концентрации  $\text{CO}_2$  во времени происходит линейно; а это справедливо только для небольшого промежутка времени. В то же время при малых промежутках времени изменения концентрации незначительны, поэтому при данном варианте расчета промежуток времени между определениями  $C_n$  и  $C_k$  берется в несколько часов.  $t$  — промежуток времени между определениями  $C_n$  и  $C_k = 10 \text{ час}$ ;  $S$  — поперечное сечение цилиндра с почвой =  $30 \text{ см}^2$  и  $h$  — высота его =  $10 \text{ см}$ . Величина

$$Q = \frac{(C_n - C_k)}{100} V = \frac{(25 - 15)}{100} \cdot 10000 = 1000 \text{ мл},$$

$$\frac{dc}{dx} = \frac{C_{cp}}{h} = \frac{20}{100 \cdot 10} = 0,02 \text{ мл/см},$$

$$D = \frac{1000}{30(10 \cdot 3600) 0,02} = 0,046 \text{ см}^2/\text{сек}.$$

$D_0$  — при условиях опыта определяется так же, как и  $D$ , только без загрузки прибора почвой, когда диффузия газа идет в воздух. При определении оказалось, что коэффициент диффузии  $\text{CO}_2$  в воздух =  $0,130$ . Отсюда

$$V_D = \frac{D}{D_0} = \frac{0,046}{0,130} = 0,35.$$

Скорость диффузии  $\text{CO}_2$  в почву в 3 раза меньше, чем в воздух.

Предложен и второй метод вычисления, основанный на втором законе Фика:

$$D \frac{d^2 c}{dx^2} = \frac{dc}{dt}.$$

Для нахождения величин  $C$  из 2-го закона Фика нужны следующие условия:

1. Диффузия происходит (в атмосферу), где концентрация диффундирующего газа постоянная или равна нулю. Если рассматривать это условие по отношению к  $\text{CO}_2$ , то при диффузии ее из сосуда в атмосферу это условие соблюдается, так как концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере —  $0,03$ , в диффузиометре —  $25 - 15\%$ .

2. Концентрация газа в сосуде  $A$  распределена равномерно. Тогда массу газа, уходящего в единицу времени, можно подсчитать по формуле

$$SD \left( \frac{dc}{dx} \right)_{x=0};$$

с другой стороны, она равна

$$V \left( \frac{dc}{dt} \right)_{x=0}.$$

Второе условие, таким образом, можно выразить как

$$V \left( \frac{dc}{dt} \right)_{x=0} = SD \left( \frac{dc}{dx} \right)_{x=0}.$$

3. Концентрация газа в сосуде постоянная:  $C_{t=0} = \text{const}$ .

Решение задачи сложно, поэтому здесь оно не приводится. Остановимся на результатах, которые получают при решении уравнения.

Решение уравнения показывает, что концентрация ( $C$ ) газа изменяется в зависимости от времени по уравнению  $C \propto e^{-\beta t}$  или  $\lg C \propto -\beta t \lg e$ , т. е.  $\lg C$  линейно зависит от  $t$ . При этом тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс  $\text{tg } \alpha = \lg e \beta$ , где  $\beta = KD$ ,  $e$  — основание натуральных логарифмов.

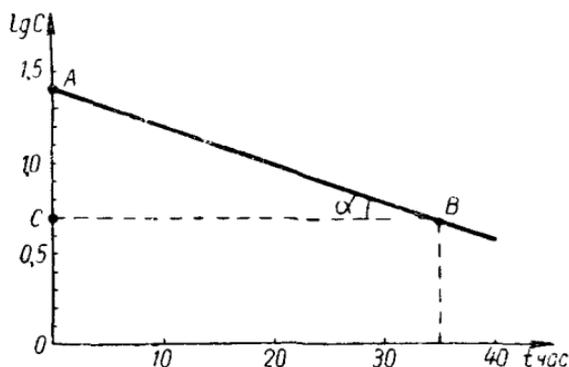


Рис. 41 Изменения концентрации газа ( $\lg C$ ) в зависимости от времени ( $t$ )

Отсюда:  $\text{tg } \alpha = \lg e KD$ , а  $D = \frac{\text{tg } \alpha}{\lg e K}$ .

Постоянная величина  $K$  зависит от размеров прибора и определяется из формулы  $K = \frac{S}{Vh}$ , где  $S$  — площадь сечения почвенной колонки;  $h$  — высота ее и  $V$  — объем диффузионной камеры.

На основании экспериментальных определений концентрации газа  $C$  в зависимости от времени ( $t$ ) строится график, по которому определяют  $\text{tg } \alpha$  — угла наклона линии  $AB$  к оси абсцисс; по ординате откладывают  $\lg C$ , по оси абсцисс время  $t$  в часах — рис. 41.

Пример вычисления: объем диффузионного сосуда = 10 000 см<sup>3</sup>, высота почвенной колонны  $h = 10$  см, площадь сечения ее  $S = 30$  см<sup>2</sup>.

Требуется определить среднее значение коэффициента диффузии  $D$  за 35 час наблюдения

$$\text{Из графика видно, что } \operatorname{tg} \alpha = \frac{AC}{CB} = \frac{1,4 - 0,7}{35} = 0,02.$$

$$\text{Из формулы } K = \frac{S}{Vh} = \frac{30}{10\,000 \cdot 10} = 3 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент диффузии вычисляется по формуле  $D = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{lge K}$ .

Подставляя числовое значение, получим:

$$D = \frac{0,02}{0,4343 \cdot 3 \cdot 10^{-4} \cdot 3600} = 0,043 \text{ см}^2/\text{сек}$$

(множитель 3600 в знаменателе введен для перевода часов в секунды;  $0,4343 = lge$ )

### Взятие проб почвенного воздуха и определение его состава

Получение проб почвенного воздуха для анализа представляет большие трудности. Необходимо применять тщательные меры по герметичности аппаратуры, чтобы во взятую пробу почвенного воздуха не проник атмосферный.

В настоящее время в практике применяются два приема извлечения воздуха из почвы. Первый — буровой метод отсасывания пробы почвенного воздуха определенного объема буром, погруженным на заданную глубину в почву. При этом остается неизвестным объем почвы, из которой взят воздух. Пробу, полученную таким путем, можно использовать для определения состава почвенного воздуха на определенной глубине и только очень приблизительно можно судить о количестве почвенного воздуха.

Второй метод — взятие пробы почвы определенного объема и выделение из нее воздуха жидкостью или путем отсасывания насосом. При этом можно определить состав почвенного воздуха и количество его в почве в объемных или весовых единицах.

**Буровой метод.** В середине XIX столетия ряд исследователей — Буссенго и Леви (1853), Петенкофер (1871) и др. применили металлические трубы для извлечения почвенного воздуха. В 20—30 гг. текущего столетия было предложено несколько буров для взятия проб почвенного воздуха — Роммель (1922), Люндегорд (1927) и др. Буры эти состоят из внешнего кожуха и проходящей внутри их полой трубки или иглы, в которую засасывается почвенный воздух. Бурами пользовались для стационарных наблюдений, размещая их на разную глубину в почву, а также и для разовых определений. Конструкции этих буров устарели, поэтому описания их мы не приводим.

Из буров, предложенных в последнее время, наиболее

перспективным представляется игла-бур Вершинина В. П. и Поясова Н. П. (1952) — рис. 42.

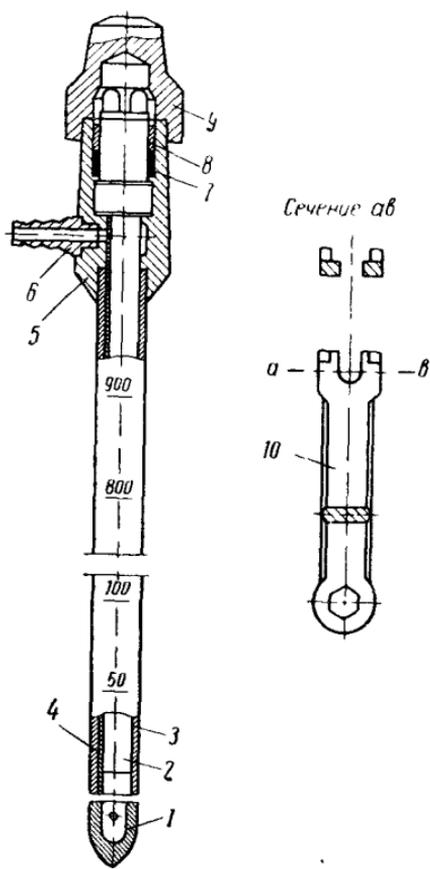


Рис. 42. Игла-бур Вершинина — Поясова:

1 — наконечник, 2 — шток, 3 — труба, 4 — продольный паз на штоке, 5, 7 — насадка, 6 — штуцер, 8 — сальник, 9 — головка, 10 — ключ

Игла-бур изготавливается из газопроводной полудюймовой трубы определенной длины (50, 100, 150, 200 см и т. д.), в которую вставлен шток (2) с запирающим наконечником (1). Шток имеет диаметр 11 мм, плотно входит в трубу и усиливает ее прочность. Конусообразный наконечник штока герметически закрывает иглу при введении ее в почву. Воздух из почвы и канала иглы забирают через штуцер (6). При заглублении иглы в почву отключение атмосферного воздуха осуществляют с помощью сальника (8). Штуцер и сальник вмонтированы в насадку (7). На верхней части трубы массивная насадка — головка (9). Ударами молотка по головке бур погружают в почву на заданную глубину. Головку, или колпак, после этого можно снять. При помощи ключа (10) вращением вправо заглубляют на 1—3 мм наконечник и шток. Между торцевой частью трубы и наконечником появляется свободное от почвы кольцевое пространство, в которое и устремляется почвенный воздух. По продольному пазу на штоке

(4) воздух поступает в приемную камеру и через штуцер по резиновой трубке в пипетку для воздуха или прямо в газоанализатор.

Короткую иглу длиной 40—50 см изготавливают без укрепления головки, так как работать с ней приходится в поверхностном, сравнительно рыхлом слое почвы, куда иглу легко вогнать рукой.

Сотрудник кафедры почвоведения МГУ М. Т. Ястребов (1956) предложил новую конструкцию иглы — рис. 43. Нижняя часть бура-иглы длиной в 35 см постепенно стачивается на конус. Рабочая часть бура — острый конус имеет длину в 2 см, на расстоянии 3,5—4 см от конца конуса, в суженной части распо-

ложены три скважины — заборные отверстия — диаметром 2 мм, сделанные в высеченных квадратиках, расположенных по спирали. Такое расположение отверстий для забора воздуха снимает давление почвы на него и предохраняет их от забивания почвой. Необходимо отметить, что игла Ястребова при работе в уплотненных горизонтах с большим трудом заглубляется и извлекается из почвы. Ее можно использовать для стационарных установок и для работы в верхнем рыхлом горизонте почвы. Игла Вершинина более прочна, поэтому может применяться на почвах разной плотности.

Взятие пробы почвенного воздуха: перед работой иглу-бур проверяют на герметичность, а затем погружают в почву на нужную глубину. Для отсасывания пробы воздуха из почвы используют пипетку Зегера (рис. 44) объемом 200—300 мм или более, наполненную насыщенным раствором NaCl.

На концах пипетка закрывается притертыми кранами. Пипетка присоединяется с помощью каучуковой трубки к выходному отверстию (штуцеру) иглы и напорной склянки. При опускании напорной склянки (2) раствор из пипетки Зегера вытекает. В ней образуется вакуум, благодаря которому засасывается почвенный воздух. Сначала из почвы берут 50 мл воздуха для промывки системы и выбрасывают его. Для этого пипетку отъединяют от иглы и вновь наполняют раствором. Отверстие штуцера иглы при отчленении пипетки должно быть изолировано, для чего на штуцер одевают каучуковую трубку с зажимом. Затем вновь присоединяют пипетку Зегера к штуцеру иглы и производят забор пробы почвенного воздуха.

После наполнения воздухом пипетку закрывают, устанавливая в специальный ящик (рис. 45). Взятую пробу воздуха анализируют в поле или в лаборатории.

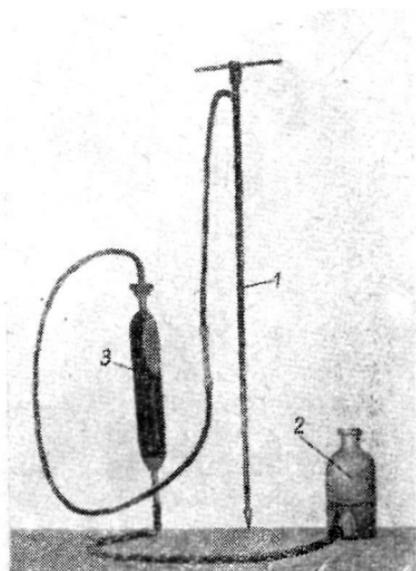


Рис. 43. Установка для взятия проб почвенного воздуха:  
1 — игла-бур Ястребова, 2 — напорная склянка, 3 — пипетка Зегера

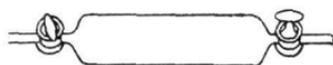


Рис. 44. Пипетка Зегера для проб газа

Для взятия пробы почвенного воздуха в поверхностном слое почвы применяют металлическую воронку типа Люндегорда — см. рис. 38.

**Метод вытеснения почвенного воздуха жидкостью.** Метод отсасывания с помощью бура или воронки не позволяет определить количество воздуха в определенном объеме почвы и извлечь воздух из тонких пор. Количественное и более полное выделение почвенного воздуха имеет место при вытеснении его жидкостью. Для получения пробы почвенного воздуха необходимо взять образец почвы определенного объема. Для этой цели

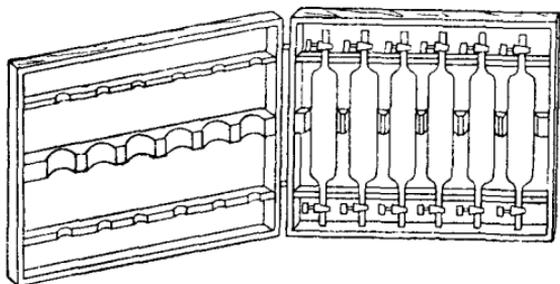


Рис. 45. Ящик для газовых пипеток

имеются специальные приборы. Разработкой их конструкции занимались Дояренко (1926), Некрасов (1925), Качинский, Гельцер (1930), Горбунов (1941) и др.

Пробу почвы определенного объема обычно берут металлическим цилиндром емкостью около одного литра, высотой около 13 см, диаметром — 10 см. Нижний конец цилиндра имеет заостренный край для более легкого погружения в почву.

Для заколачивания цилиндра в почву следует иметь направлятель и шомпол такого же типа, как в приборе Качинского для определения объемного веса почвы. Почву берут в цилиндр с глубины 0—10; 10—20; 20—30 см последовательно с одного и того же места. Перед погружением в почву цилиндр смазывают вазелином.

Цилиндр с обоих концов герметически закрывают крышками, в центре которых имеются отверстия, прикрытые металлической сеткой. От этих отверстий идут тубусы для каучуковых пробок. Крышки хорошо смазывают и надевают на цилиндр. На тубус верхней крышки цилиндра надевают каучуковую трубку с зажимом, присоединяющую цилиндр к газоприемнику. Нижняя крышка закрывается каучуковой пробкой. После взятия пробы цилиндр с почвой доставляют в лабораторию или обрабатывают в поле. По данным Вершинина и Поясова, в герметично закрытом образце почвы за счет микробиологических процессов накапливается  $\text{CO}_2$  со скоростью до 1% в час. Следовательно, после взятия образца почвы нужно как можно быстрее производить вытеснение из него воздуха. Для выделения воздуха из взятой

пробы почвы цилиндр погружают в бак с насыщенным раствором NaCl на специальную подставку (9) (рис. 46), соединяют с газоприемником. После снятия пробки под раствором, последний поступает в почву, вытесняя воздух, который затягивается в градуированный газоприемник или в пилетку Зегера (5). Процесс вытеснения почвенного воздуха продолжается 10—16 мин.

А. Г. Дояренко почвенный воздух из цилиндра получал путем отсасывания его насосом Комова, но этот метод менее точен.

Горбунов (1941), сравнивая данные по содержанию  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе, полученные методом вытеснения воздуха из почвы водой, засасыванием буром-иглой и воронкой, нашёл, что в первом методе в поверхностных слоях почвы в воздухе всегда получается  $\text{CO}_2$  примерно на 30% больше, чем в пробах воздуха, взятых с тех же глубин буром-иглой и воронкой. Автор объясняет это тем, что при засасывании воздуха буром-иглой и воронкой в них попадает воздух из атмосферы. По нашему мнению, при вытеснении воздуха из почвы жидкостью извлекаются порции застойного воздуха, заземленного, и воздуха узких пор, который всегда более богат содержанием  $\text{CO}_2$ .

Метод получения проб почвенного воздуха путем вытеснения его жидкостью следует широко применять при изучении воздушного режима пахотного слоя под разными сельскохозяйственными культурами.

Вышеописанный цилиндр можно использовать для изучения биологической активности почв, интенсивности разложения органического вещества по количеству выделяемой из почвы  $\text{CO}_2$ . Для этого один конец прибора присоединяют к склянке Тищенко со щелочью для поглощения  $\text{CO}_2$  из воздуха, а второй — к поглотителям с  $\text{VA}(\text{OH})_2$  и аспиратору. Через образец периодически пропускают в час 1—2L воздуха и определяют количество в нем  $\text{CO}_2$ . По объему  $\text{CO}_2$  судят о биологической активности почв.

Необходимо отметить, что количественное содержание почвенного воздуха обычно выражают в мл на литр почвы или в объемных процентах, так как ввиду малого удельного веса воздуха и газов весовые измерения малопоказательны.

**Анализ почвенного воздуха.** Свободный или адсорбированный воздух, выделенный из почвы, подвергают анализу. Непосред-

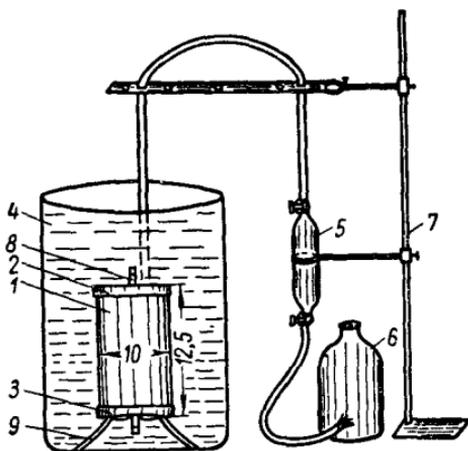


Рис. 46. Схема установки для вытеснения почвенного воздуха жидкостью: 1 — цилиндр, 2, 3 — крышки цилиндра, 4 — сосуд с жидкостью, 5 — пилетка Зегера, 6 — напорная склянка, 7 — штатив, 8 — тубус с каучуковой пробкой, 9 — подставка

ственно обычно определяют количество  $O_2$ ,  $CO_2$ , а  $N_2$  по разности; иногда в анаэробных условиях почвы интерес представляют газы  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $C_2H_2$  и  $CH_4$ , а также органические газообразные летучие вещества почвенной атмосферы, которые пока еще очень мало исследованы и требуют специальной методики. Существует много методов определения газов — манометрический, вискозиметрический, кондуктометрический, флуоресцентный, адсорбционный, абсорбционный и другие, которым посвящены специальные руководства (Соколов А. В. (1958), Еремина В. Г. (1955), Черепенников А. А. (1951) и др.).

В большинстве случаев количество газов в почве определяют абсорбционным весовым или объемным методом с помощью соответствующих поглотителей.

**Поглотители кислорода.** 1) *Медь*. Пластинки меди или отрезки медной проволоки, по длине соответствующие габариту прибора, погружают в раствор  $NH_4Cl$  в водном растворе аммиака. Кислород поглощается поверхностью меди, а образующаяся при этом закись меди растворяется в растворе аммиака. По сравнению с щелочным раствором пирогаллола медь имеет большую поглотительную способность. При хорошей защите в приборе от кислорода атмосферы одной зарядкой можно провести до 200 определений.

2) *Щелочный раствор пирогаллола*. Пирогаллол-триокси-бензол  $C_6H_3(OH)_3$  является веществом чрезвычайно легко окисляющимся, особенно в щелочных растворах. Он обладает высокой абсорбционной способностью в отношении кислорода. Применяют свежеприготовленные сильно щелочные растворы. Во время абсорбции при высоком содержании кислорода (40—50%) и при повышении температуры до  $35^\circ$  может выделяться окись углерода, что необходимо учитывать во избежание отравления работающего.

Сначала готовят 33-процентный раствор  $KOH$ : 48 г сухого  $KOH$  растворяют в 100 мл воды. Смесь 28 г пирогаллола с 80 мл слегка подогретой воды выливают в 118 мл раствора 33-процентного  $KOH$ .

**Поглотители  $CO_2$ .** Для определения  $CO_2$  широко используется: 1) *концентрированный раствор щелочи* —  $KOH$  — 33-процентный, приготовляемый вышеуказанным способом, и 2) *титрованный* — 0,1 н. раствор  $Ba(OH)_2$ . Титрование последней производят 0,01 н.  $HCl$ .

*Сухой поглотитель* — аскарит представляет собой асбест, обработанный  $NaOH$  и измельченный до частиц размером 1—0,5 мм. Однократное наполнение поглотителя хватает на 30—35 анализов.

Следует помнить: щелочные растворы являются одновременно поглотителями хлора, хлористого водорода, сероводорода и двуокиси серы.

Поглотители сероводорода. При высоком содержании  $H_2S$  в качестве поглотителя применяют мышьяковистую кислоту  $H_3AsO_3$ , при малом содержании сероводорода определение его производят с помощью титрования с использованием 0,1 н. раствора  $J_2$  в йодистом кали, через который пропускают определенный объем исследуемого газа. При этом имеет место реакция:  $H_2S + 2J = 2HJ + S$ . Оставшийся свободный йод оттитровывается 0,1 н. раствором  $Na_2S_2O_3$  в присутствии 1-процентного крахмального раствора. Присутствие  $H_2S$  можно обнаружить лакмусовой бумагой — влажная синяя бумага краснеет.

А м м и а к — поглощается 10-процентным раствором  $H_2SO_4$  после поглощения  $CO_2$ . Обнаружить присутствие  $NH_3$  можно качественной пробой — красная лакмусовая бумага синеватая от его действия, а также с помощью реактива Неслера, дающего при взаимодействии с аммиаком желтое окрашивание раствора.

П а р ы в о д ы. Существенной составной частью почвенного воздуха являются пары. Пары воды жадно поглощаются фосфорным ангидридом —  $P_2O_5$  или хлористым кальцием —  $CaCl_2$ . Довольно чувствительной и быстро протекающей реакцией является действие паров воды на карбид кальция, в результате которой выделяется ацетилен:  $CaC_2 + 2H_2O = C_2H_2 + Ca(OH)_2$ . Измеряют объем или вес выделившегося ацетилена, устанавливают коэффициент перевода веса или объема ацетилена на вес воды и вычисляют содержание  $H_2O$  во взятой пробе.

Р а с ч е т ы. Количество определяемого газа выражают обычно в объемных единицах в мл на 100 мл, т. е. в объемных процентах; реже — в весовых единицах в мг на 100 мл или на 1000 мл.

Приведение объема газа  $V$  к нормальным условиям (температура  $0^\circ$  и давление 760 мм рт. ст.) производится на основании уравнения Менделеева—Клапейрона (см. приложения, табл. 3).

Если нужно определить объем сухого газа  $V_0$ , нагретого до  $t^\circ C$  при температуре  $0^\circ$  и давлении  $P_0 = 760$  мм, то по таблице физических величин определяют упругость паров воды  $m$  в атмосфере при данной температуре  $t^\circ$  и давлении  $P_1$  (см. приложения, табл. 4) и тогда

$$V_0 = V \frac{P_1 - m}{P_0 (1 + 0,00367 t^\circ)}. \quad (44)$$

Вычисление количества газа при определении его титрованием. Для примера возьмем определение  $CO_2$  титрованным 0,01 н. раствором  $Ba(OH)_2$ .

При расчете объемного содержания  $CO_2$  принимают, что 1 мл 0,1 н. раствора  $Ba(OH)_2$  при нейтрализации его  $H_2CO_3$  соответствует 1,12 мл  $CO_2$  при нормальных условиях. Разберем общий принцип расчета веса и объема определяемого газа методом титрования.

Пример: объем анализируемого воздуха = 100 мл. Для поглощения  $CO_2$  взято 25 мл  $Ba(OH)_2$ ; на титрование его перед

опытом израсходовано 42 мл 0,01 н. HCl, после поглощения CO<sub>2</sub>—39 мл 0,01 и HCl. Таким образом, на титрование H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> было израсходовано 0,03 м/экв. Ва(OH)<sub>2</sub>.

Исходя из этого можно сказать, что в 1 л воздуха будет содержаться 0,3 м/экв CO<sub>2</sub> или в граммах на литр

$$\frac{0,3 \cdot 44}{1000 \cdot 2} = 0,0066 \text{ г (44 — молекулярный вес CO}_2\text{)}.$$

Одна граммолекула газа при нормальных условиях занимает объем 22,400 мл.

Весовое количество CO<sub>2</sub> переведем в объемное —  $\frac{22400 \cdot 0,0066}{44} = 3,3$  мл в литре воздуха, или 0,33% объема взятой пробы воздуха.

Вакуумные замазки. При газовых анализах для герметичности аппаратуры все места стыков покрывают специальными замазками. Чаще всего используют менделеевскую замазку и пицеин.

Менделеевская замазка готовится путем смешивания 100 весовых частей канифоли с 25 частями воска. В расплавленную массу при помешивании добавляют 30—40 частей прокаленной мумии (окись железа) и 0,1—1 часть олифы или льняного масла.

Приготовление пицеина: к 30 частям по весу натурального каучука прибавляют 25 частей белого вазелина и 5 частей парафина. Каучук нарезают мелкими кусочками, смесь нагревают до 150—160° и выдерживают при этой температуре в течение 180—200 час, периодически перемешивая. Если нужна более подвижная смазка, то увеличивают дозу вазелина.

Указанные смазочные вещества хорошо пристают к стеклу и металлу (сухим и нагретым).

### Приборы для определения состава почвенного воздуха

В настоящее время имеется ряд газоанализаторов, предложенных разными авторами, — Дояренко (1926), Вершинина и Поясова (1952), Турлюна (1952), газоанализатор системы Орса, Фишера и ВТИ (1948). На описании последнего мы и остановимся. В принципе он такого же типа, как и вышеперечисленные. Преимущество его в том, что он серийно производится и каждой лабораторией может быть легко приобретен.

Газоанализатор ВТИ (рис. 47) состоит из двухколенной бюретки (1,2) с вилкой (3), соединяющей оба колена, и уравнивательной склянки (11); семи поглотительных сосудов (8), состоящих из верхнего и нижнего резервуаров. В верхней части сосудов имеются краны, соединяющие их с гребенкой (6). Ниже крана наносится черта, до которой наливают поглотитель (13).

Гребенка (6) — стеклянная трубка, проходящая через весь прибор, к которой присоединяются при помощи резиновых стыков все части прибора. В левой части гребенки вделан трехходовой кран (7), соединяющий ее с атмосферой и газоприемником. Кроме того, имеется приспособление (16) для сжигания газов, которое при анализе почвенного воздуха почти не используется.

Газовая бюретка состоит из левого колена с шарообразными вздутиями объемом в 80 мл и правого колена цилиндрической формы емкостью 20 мл, градуированного с точностью до 0,05 мл. Точность градуировки можно довести до 0,005, уменьшая диаметр трубки и переводя часть ее объема в шарообразную форму, чтобы уложиться по длине в пределы габарита прибора. Высокая точность измерительной бюретки необходима особенно для анализа почвенного воздуха, в котором содержание некоторых составных частей равняется десятым долям процента. Бюретка вмонтирована в стеклянный кожух (15), наполненный водой, во избежание резких колебаний температуры в течение опыта. Развилка (3),

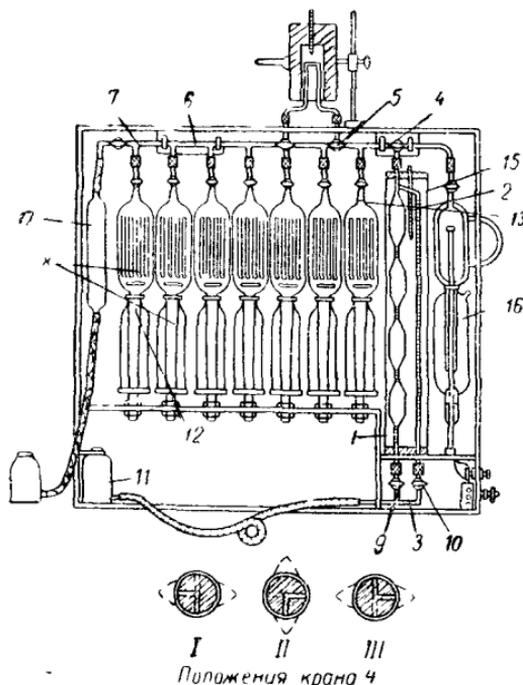


Рис. 47. Газоанализатор ВТИ:

1, 2 — двухколесная бюретка, 3 — вилка, 4, 5, 7 — трехходовые краны, 6 — гребенка, 8 — поглотительные сосуды, 9, 10 — краны, 11, 14 — напорные склянки, 12 — отверстие, 13 — отметка, до которой наливается поглотитель, 15 — стеклянный кожух, 16 — пипетка с платиновой спиралью и подводкой тока, 17 — пипетка Зегера

соединяющая оба колена бюретки, благодаря наличию кранов (9) и (10), допускает раздельное пользование резервуарами бюретки. В верхней части бюретки имеется трехходовой кран (4), соединяющий ее по мере надобности с гребенкой и атмосферой. Перед работой с прибором необходимо изучить систему соединений кранами. Сделать на них метки черным лаком одинаковые при одинаковом положении.

После этого можно приступить к наполнению бюретки затворной жидкостью, в которой газы мало растворимы. В качестве такой жидкости используют насыщенный раствор NaCl (360 г на 1 л воды) (см. приложения, табл. 6). Можно применять для той же цели ртуть, в ней газы почти не растворяются;

воду, подкисленную серной кислотой, при определении  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ . Однако более универсальным и доступным является насыщенный раствор  $\text{NaCl}$ . Для более точного отсчета в бюретке его подкрашивают метилоранжем. При заполнении бюретки раствором ее соединяют краном (4) с атмосферой и путем подъема напорной склянки (11) наполняют сначала левое, потом правое колено бюретки.

Наполнение сосудов поглотителями. Перед наполнением жидкостью сосудов верхнюю часть их загружают стеклянными узкими капиллярными трубками для увеличения поверхности взаимодействия анализируемого газа и поглотителя. Наполнение поглотителями осуществляется через отверстие (12), в которое вставляют воронку. В нижнюю часть прибора наливают около 200 мл поглотителя. Затем соединяют сосуд с бюреткой и путем опускания жидкости в бюретке с помощью напорной склянки (11) подтягивают поглотитель в верхнюю часть сосуда до черты.

Затем переводят жидкость из напорной склянки в бюретку и таким же путем наполняют следующие сосуды: первый сосуд-поглотитель заполняют раствором КОН для поглощения  $\text{CO}_2$ , второй и третий — наполняют щелочным раствором пирогаллола для поглощения кислорода. Если в качестве поглотителя используют раствор меди, то можно заполнять один сосуд поглотителем кислорода. Остальные сосуды заполняют по мере надобности при определении других газов и паров ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) соответствующими поглотителями.

Перед работой необходимо проверить герметичность соединения в приборе; для этого пипетку наполняют насыщенным раствором  $\text{NaCl}$  до метки 0, отъединяют от атмосферы и бюретки Зегера (17). При открытых кранах, если система держит вакуум, уровень жидкости в обоих коленах измерительной пипетки при опускании напорной склянки (11) останется на нулевой отметке или немного спустится и остановится. Если система не держит вакуума, то раствор  $\text{NaCl}$  из бюретки быстро перельется в склянку. В таком случае необходимо проверить герметичность всех соединений. После этого промывают гребенку и пипетку анализируемым газом. Под напором жидкости склянки (14) газ из воронки Зегера подают в гребенку (6) при наполненной бюретке и затем выпускают в атмосферу через кран (4). Если позволяет объем анализируемого газа, промывку следует делать 2—3 раза. Затем берут анализируемый газ в бюретку — в первое широкое колено 80 мл и во второе, узкое, градуированное, до 18 см, что в сумме составляет 98 мл; 2 мл объема занимает гребенка, поэтому объем взятой пробы можно считать равным 100 мл.

Наполнение бюретки анализируемым газом осуществляют опусканием напорной склянки (11) при открытых кранах (9)

и (10). Наполнять оба колена бюретки можно сразу или последовательно — сначала первое, потом второе.

После взятия проб газа, чтобы уравнивать давление внутри и вне прибора, на миг соединяют кран (5) с атмосферой. Если при этом уровень газа в градуированной части бюретки изменился, его корректируют на отметку 18 деления с помощью склянки, после чего уровень жидкости в напорной склянке (11) совмещают с уровнем градуированной части пипетки. Затем перегоняют анализируемый воздух из бюретки поднятием напорной склянки (11) в первый поглотитель с КОН, где поглощается  $\text{CO}_2$ . Воздух в поглотителе выдерживают 2—3 мин и вновь возвращают в пипетку. Так повторяют 3—5 раз, после чего измеряют объем оставшегося воздуха. Для этого уровень жидкости в склянке перед отсчетом совмещают с уровнем в отсчетной бюретке. Убыль объема газа непосредственно дает процент  $\text{CO}_2$ . Последовательно таким же путем определяют другие компоненты исследуемого воздуха.

Результат анализа оформляют таблицей.

При производстве газового анализа в начале, середине и конце опыта измеряют температуру и атмосферное давление.

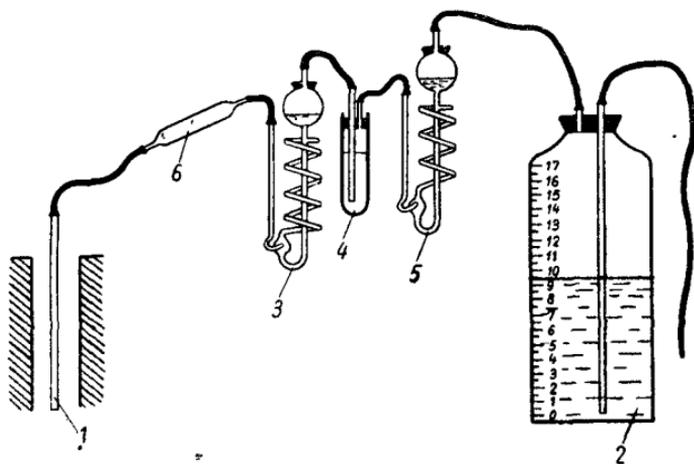


Рис. 48. Спиральный поглотительный прибор:

1 — бур для взятия пробы газа, 2 — градуированный аспиратор,  
3, 4, 5 — сосуды для поглотителей

Если эти показатели в течение опыта изменялись, то объемы анализируемых газов приводят к нормальным условиям вышеописанным способом и затем уже дают таблицу состава анализируемого газа.

**Определение газов при низких концентрациях.** Некоторые газы, как  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$  содержатся в почвенном воздухе в небольшом количестве. В таком случае для более точного определения необходимо брать и анализировать большие объемы воздуха и во избежание изменения газов определение следует

вести на месте в природной обстановке. Для этой цели может служить установка, представленная на рис. 48.

Бур (1) для взятия пробы газа погружают в почву на заданную глубину и затем при помощи градуированного аспиратора (2) через соответствующие поглотители просасывают тот или иной объем газа.

При определении газа методом титрования сосуда для поглотителей лучше брать спиральной формы (3, 5) (рис. 48). Раствор, заключенный в них, титруют перед опытом и после опыта и затем производят расчет.

При весовом определении сосуда для поглощения лучше брать U-образной формы. Их легче и проще взвешивать.

**Определение паров воды в почвенном воздухе.** Количественное определение паров почвенного воздуха имеет практическое значение при изучении передвижения парообразной влаги, конденсации ее в почве и для других случаев. Определение паров воды в почве ведут с помощью поглотителей  $P_2O_5$  и  $CaCl_2$ , которыми наполняют U-образные трубки; затем через них просасывается с помощью аспиратора определенный объем почвенного воздуха, предварительно взятого в газоприемник. Содержание паров рассчитывают в граммах на 1 м<sup>3</sup> почвенного воздуха по формуле:

$$W \text{ г/м}^3 = \frac{B}{V} \cdot 1000 K, \quad (45)$$

где  $B$  — привес в трубках с поглотителями;  $V$  — объем взятого воздуха в м<sup>3</sup>;  $K$  — коэффициент, который вводится для приведения объема воздуха к нормальным условиям,

$$K = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{(1 + 0,00367 t^{\circ})}, \quad (46)$$

где  $P$  — атмосферное давление в момент определения;

$P_0$  — нормальное атмосферное давление,  $t^{\circ}$  — температура

По табл. 6 (см. Приложения) можно определить упругость паров в почвенном воздухе  $m$  и относительную влажность воздуха, если известна температура взятой пробы почвенного воздуха. В качестве поглотителя применяют иногда карбид кальция.

Выделяющийся при этом ацетилен учитывают весовым методом по убыли веса трубки, если дают ацетилену свободно уходить под тягой в атмосферу, или титрованием.

**Определение растворенных газов в почвенной воде.** В почвенном растворе растворенные газы встречаются в переувлажненных — заболоченных или орошаемых почвах, на рисовых полях, а также в тех случаях, когда грунтовые воды залегают на небольшой глубине и принимают активное участие в жизни почвы и растений.

Растворенные газы можно определить в почвенных растворах и в грунтовых водах непосредственно титрованием соответ-

ствующими реактивами или выделить их с помощью кипячения и вакуума, а затем определить состав описанными ниже способами.

В последнее время в практику почвенно-мелиоративных исследований все шире входит метод определения азрации почвы и почвенного раствора по окислительно-восстановительному потенциалу — *Еh*.

Химические методы определения некоторых компонентов растворенных газов. Для определения растворенных газов в почвенно-грунтовой воде берут пробы специальными приборами — батометрами или бурами, заборная часть которых устроена по типу шприца. В них взятую пробу воды герметически закрывают и затем с большими предосторожностями, изолируя пробу от контакта с атмосферой, переносят в склянку с пришлифованной пробкой.

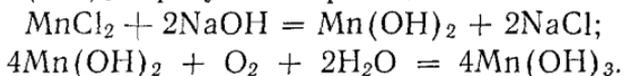
При неглубоком залегании почвенно-грунтовых вод пробы воды можно брать буром-иглой, засасывая в склянку Зегера воду так же, как почвенный воздух (см. стр. 147).

В этом варианте для проб воды желательно иметь специальные склянки, имеющие тубус на дне и широкое горло с пришлифованной пробкой и с краном для присоединения к аспиратору. Тогда определение растворенного газа производят прямо в этих склянках.

*Кислород*, растворенный в почвенных водах, определяют по Винклеру.

Ход анализа таков: в склянку с пришлифованной пробкой емкостью 300 мл, градуированную с точностью до 1 мл, берут анализируемую пробу почвенно-грунтовой воды. В наполненную до краев склянку прибавляют по 1 мл раствора хлористого марганца (80 г соли растворяют в хорошо прокипяченной дистиллированной воде) и едкого натра (3,2 г в 100 мл воды). В сумме объем пробы и добавленных реактивов составляет 300 мл.

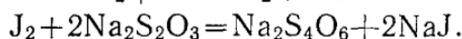
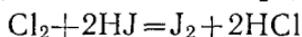
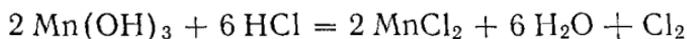
Склянку закрывают и несколько раз энергично перевертывают для перемешивания содержимого. Гидрат закиси марганца, образующийся в результате взаимодействия  $MnCl_2$  и  $NaOH$ , окисляется растворенным в воде кислородом в тригидрат марганца —  $Mn(OH)_3$  в результате реакции:



При отстаивании осадок собирается внизу, после чего добавляют в колбу 5 мл концентрированной  $HCl$  и 0,5 г кристалликов  $KJ$ . Пробку закрывают, и склянку встряхивают.

В результате взаимодействия реактивов осадок  $Mn(OH)_3$  растворяется в  $HCl$ , выделяется свободный  $J$ , количество которого эквивалентно растворенному в воде  $O_2$ . Йод оттитровывают 0,01 н. раствором тиосульфата.

При этом происходят следующие реакции:



Титрование тиосульфатом производят в конической колбе емкостью на 750 мл. В качестве индикатора применяют 1-процентный раствор крахмала.

Вычисление: 1 мл 0,01 н. раствора  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  соответствует 0,08 мг кислорода (эквивалент кислорода — 8, умноженный на нормальность раствора).

Пример: объем склянки 300 мл, на титрование выделившегося йода пошло 15,0 мл раствора  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 0,0094 \text{ N}$ . Количество растворенного в воде  $\text{O}_2$  мг/л =  $\frac{8 \cdot 15,0 \cdot 0,0094 \cdot 1000}{300 - 2}$ ,

где 2 мл — объем добавленных реактивов  $\text{MnCl}_2$  и  $\text{NaOH}$ .

Зная температуру анализируемой воды и определив растворимость газа в воде при данной температуре по табл. 27, определяют степень насыщенности ее кислородом в процентах.

Например, при наличии в пробе 5 мг кислорода на литр при  $20^\circ$ , степень насыщенности раствора кислородом =  $\frac{5}{9,10} \cdot 100 = 55\%$ .

Таблица 27

Растворимость кислорода в воде в мг/л

$t^\circ\text{C}$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$\text{O}_2$ в мг/л	14,57	13,7	13,07	12,4	11,8	11,26	10,78	10,28	9,85	9,45	9,10	8,74

Весовое количество кислорода можно перевести в объемное. Насыщенность данного раствора кислородом в объемных единицах вычисляют с помощью табл. 5 приложения.

Вода рек, озер обычно содержит 4—5 мг кислорода на литр. Содержание его в почвенных растворах может резко меняться (от 0 до 10—15 мг/л).

*Определение сероводорода* необходимо производить на месте взятия образца воды. Определение  $\text{H}_2\text{S}$  основано на взаимодействии его с йодом. Для определения составляют реактивы:

1) децинормальный раствор йода, содержащий 12,7 г очищенного возгонкой йода и 20 г  $\text{KJ}$  в литре раствора. Из него получают 0,01 н. раствор путем разбавления в 10 раз;

2) свежий титрованный 0,01 н. раствор  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (готовится для каждого определения);

3) раствор уксусной кислоты  $\text{CH}_3\text{COOH}$  — 50%;

4) 1-процентный раствор крахмала (индикатор).

В колбу берут 10 мл 0,01 н. раствора йода и 1 мл 50-процентного  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , затем добавляют 100 мл анализируемой воды, только что взятой. Избыток взятого раствора йода оттитровывают 0,01 н. раствором тиосульфата в присутствии крахмала.

Для вычисления в условиях, аналогичных условиям опыта, необходимо установить соотношение между растворами йода и тиосульфита, беря при этом дистиллированную воду в объеме, равном объему анализируемой воды. По разности расхода тиосульфита при титровании пробы воды и дистиллированной воды вычисляют содержание сероводорода в исследуемой пробе.

Расчет: на 10 мл раствора йода израсходовано 9,9 мл 0,0108 н. раствора  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ . Так как в расчетах используется концентрация 0,01 н., то израсходованное количество тиосульфата умножается на коэффициент

$$K = \frac{0,0108}{0,0100} = 1,08.$$

На 100 мл исследуемого раствора пошло 10 мл раствора йода и 8,7 раствора тиосульфата. Разность в расходовании тиосульфата =  $9,9 - 8,7 = 1,2$  мл, что соответствует  $1,2 \cdot 1,08 = 1,296$  мл 0,01 н.  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .

1 мл 0,01 н.  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  соответствует 0,1703 мг сероводорода. В литре анализируемого раствора содержится

$$0,1703 \cdot 1,296 \cdot 10 = 2,2 \text{ мг } \text{H}_2\text{S}.$$

*Определение растворимой  $\text{CO}_2$ .* Закрытую бутылку со взятой почвенно-грунтовой водой доставляют в лабораторию. В воде титрованием определяют общую кислотность. Для этого к 50—100 мл пробы прибавляют каплю фенолфталеина. Пробу титруют 0,01 н.  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  или 0,02 н.  $\text{NaOH}$  до появления не исчезающей в течение 2—3 мин красной окраски.

Далее определяют кислотность пробы воды, зависящей от нелетучих органических соединений. Для этого 50—100 мл исследуемого раствора подвергают кипячению в течение 30 мин или пока в стаканчике не останется около  $\frac{3}{4}$  взятого объема жидкости, прибавляют каплю фенолфталеина и титруют горячую жидкость тем же реактивом, что и при определении общей кислотности, до появления не исчезающей в течение 2—3 мин красной окраски.

Из объема  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , потраченного при определении общей кислотности, вычитают объем, потраченный при втором титровании, и получают объем  $\text{Ba}(\text{OH})_2 - V$ , употребленный на титрование свободной  $\text{CO}_2$ . Количество  $\text{CO}_2$  в граммах в пробе равняется  $V \cdot 0,00022$ , где 0,00022 — коэффициент перевода 1 мл 0,01 н. раствора  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  в соответствующее весовое количество  $\text{CO}_2$ .

## АЭРАЦИЯ ПОЧВЕННОГО РАСТВОРА И ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Широко распространенные окислительные и восстановительные процессы в почве измеряются окислительно-восстановительным потенциалом  $Eh$  (ОВП).

Величина  $Eh$  характеризует упругость электронов в системе почва — раствор, способных принимать участие в процессах окисления и восстановления, которые в сильной мере зависят от аэрации почвы и в особенности от содержания в почвенном воздухе и, соответственно, в растворе кислорода.

Щербаков (1956), исследуя грунтовые воды, нашел, что  $Eh$  их увеличивается пропорционально количеству растворенного в воде  $O_2$  и обратно пропорционально концентрации сероводорода. Величина ОВП определяется уравнением Нернста:

$$Eh = E_0 + 59 \lg \frac{O_x}{R_{ed}}, \quad (47)$$

$O_x$  и  $R_{ed}$  — концентрации окислителя и восстановителя в почве.  $E_0$  — нормальный потенциал данной системы, возникающий на электроде при погружении его в раствор 1 н. концентрации окислителя и восстановителя.

На величину  $Eh$  большое влияние оказывает наличие в почве элементов переменной валентности Fe(2-3), Mn(2-3-4), Cu(1-2-валентного) и т. п.

При этом элементы, находящиеся в состоянии высшей валентности (окисленные), повышают значение  $Eh$ , при низшей валентности снижают ОВП. Резко снижает величину  $Eh$  в почве наличие свежих органических остатков.

При  $Eh$  600 — 700  $mV$  — в почве максимальные аэробные условия;

При  $Eh$  400 — 600  $mV$  — почвы нормально аэрируемые;

При  $Eh$  400 — 300  $mV$  — аэрация затруднена. Может иметь место денитрификация.

Нижняя граница зоны окисления там, где  $Eh$  от 250 до 300  $mV$ . Выше этой границы идут процессы окисления, ниже — восстановления.

При  $Eh < 200$  в почве идут процессы восстановления — оглеения, переход окисных форм в закисные и т. п. В резко восстановительных условиях  $Eh$  имеет отрицательное значение.

На основании величин  $Eh$  и рН вычисляют показатель  $rH_2$ .

$$rH_2 = \frac{Eh}{30} + 2 \text{ рН}. \quad (48)$$

Показатель  $rH_2$  характеризует количество газообразного водорода в растворе и представляет собою отрицательный логарифм его концентрации

$$rH_2 = - \lg H_2. \quad (49)$$

Чем больше  $H_2$ , тем меньше  $rH$ . Следовательно, восстановительная способность раствора тем больше, чем меньше  $rH_2$ .

Равновесному состоянию концентрации  $O_2$  и  $H_2$  соответствует значение  $rH_2 = 27$ . Чем выше  $rH_2$ , тем лучше аэрация почвы.  $Eh$  измеряют потенциометром, компенсационным методом, сущность которого состоит в том, что два элемента (один — элемент Вестона — с известной электродвижущей силой =  $1018\text{ mV}$ , другой неизвестный —  $X$ ) присоединяют к сопротивлению  $AB$  так, чтобы электродвижущие силы их имели взаимно-противоположное направление. Меняя сопротивление в цепи, добиваются в системе отсутствия тока, что устанавливается показанием гальванометра (рис. 49).

Сначала подвижный контакт  $C$  ставят в точку  $B$ , переключателем  $K_2$  присоединяют нормальный элемент  $W$ . На сопротивление  $AB$  со стороны нормального элемента подается электродвижущая сила (э. д. с.)  $1018\text{ mV}$ , со стороны сухого элемента  $1500\text{ mV}$ . Вследствие отсутствия компенсации в цепи пойдет ток, который будет обнаружен гальванометром при нажатии ключа  $K_1$ . Добавочным сопротивлением  $ДС$  добиваются компенсации (т. е. нулевого показания гальванометра), при которой на проволоку  $AB$  будет подано от обоих элементов одинаковая э. д. с. =  $1018\text{ mV}$ . При длине проволоки =  $1018\text{ мм}$  каждое деление в  $1\text{ мм}$  будет соответствовать  $1\text{ mV}$  э. д. с.

После этого вместо нормального элемента поворотом переключателя  $K_2$  к цепи присоединяют исследуемый элемент (раствор или суспензия почвы)  $X$  и путем контакта  $C$ , используя сопротивление проволоки  $AB$ , добиваются компенсации. Полученный отсчет по линейке будет соответствовать количеству  $mV$  э. д. с. элемента  $X$ . Вместо проволоки применяют иногда магазин сопротивлений.

Для определения ОВП применяют потенциометры марки П-4, П-5, а также ламповые потенциометры ЛП-4, ЛП-5 и ЛП-3. Питание в последнем производится за счет сухих батарей, поэтому его легко применять в экспедиционных исследованиях. Довольно распространен в практике потенциометр П-4.

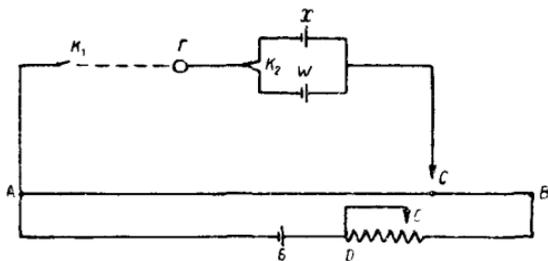


Рис. 49. Схема установки для определения ОВП ( $Eh$ ):

$X$  — испытуемый раствор,  $W$  — нормальный элемент,  $G$  — гальванометр,  $K_1$  — ключ для включения в цепь,  $K_2$  — переключатель для нормального элемента испытуемого раствора,  $A-B$  — проволока сопротивления длиной  $1018\text{ мм}$ ,  $ДС$  — добавочное сопротивление (полнозвукового реостата на  $40-60\text{ о.и.}$ ),  $B$  — сухой элемент или аккумулятор на  $1500-200\text{ mV}$ ,  $C$  — подвижный контакт

Во избежание ошибок за счет поляризации электродов к нему подключают ламповый усилитель системы УЛ-1 или пользуются вообще ламповыми потенциометрами названных марок. Так как потенциометры и усилители фабричного производства, то при них наряду с паспортом дается описание их и инструкция по использованию и хранению, поэтому описание их здесь не приводится.

При измерении ОВП в почве применяют платиновый электрод и каломелевый — электрод сравнения. Платиновые электроды не платинируются. По данным Ремезова (1929) это не сказывается на точности определения. Однако есть указание на то, что платинированные электроды дают более устойчивые значения ОВП.

Изготавливают платиновые электроды из пластинки в форме треугольника или прямоугольника с припаянной к ней проволокой, которую помещают в стеклянную трубку так, чтобы часть пластинки была вставлена в стекло, что придает электроду прочность. Стеклянную трубку затем заполняют ртутью и, во избежание испарения последней, заливают сверху парафином. Можно изготавливать электроды и из платиновой проволоки толщиной 0,5 мм.

Перед употреблением платиновые электроды для очищения поверхности обрабатывают раствором  $H_2SO_4$  с  $K_2Cr_2O_7$ ; промывают в проточной воде и выдерживают несколько часов в дистиллированной воде. Затем электроды прокаливают на пламени спиртовой горелки, что способствует установлению постоянного потенциала. Измерения  $Eh$  делают с тройной повторностью.

Вторым электродом является каломелевый электрод, изготавливаемый из очищенной ртути, каломелевой пасты и насыщенного раствора  $KCl$ .

Электроды проверяют по буферной смеси: смесь готовят следующим образом: в 1 л бидистиллированной воды растворяют  $1/300$  моль красной кровяной соли,  $1/300$  моль желтой кровяной соли и  $1/10$  моль  $KCl$ . Если измеренная с помощью взятых электродов электродвижущая сила будет равна 430  $mV$ , то электроды считаются пригодными.

Почву помещают в стеклянный стаканчик, разбавляют водой (1:1). Воду берут дистиллированную, прокипяченную, лишенную растворимых газов. Через 10 мин после погружения электродов измеряют  $Eh$ . Измерение через определенные промежутки времени повторяют до тех пор, пока величина потенциала не станет постоянной или будет изменяться в течение 5 мин не более чем на 2  $mV$ .

Измерение ОВП можно производить непосредственно в поле, в разрезе на определенной глубине. В стенку разреза почвы вставляют платиновый и каломелевый электроды. Последний можно соединить с первым через электролитический ключ

U-образная трубка, наполненная раствором KCl с агар-агаром).

Полученную на приборе величину  $Eh$  приводят к водородному электроду, э. д. с. которого приравнивается к нулю. К измеренной  $Eh$  прибавляют э. д. с. каломелевого электрода при соответствующей температуре, если каломелевый электрод был отрицательным полюсом в цепи, и вычитают — при положительном (подробно методику определения см. в работе Сердобольского «Агрехимические методы исследования почв», изд. АН СССР, 1954).

---

## ГЛАВА V

### МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Почва состоит из твердой, жидкой и газообразной фазы. Количественное содержание воды в почве называют ее влажностью. Вода в почве оказывает большое влияние на почвообразование, обуславливая интенсивность биологических и элювиальных процессов. Поэтому в различных климатических зонах формируются особые зональные почвы. Влажность почвы является одним из основных факторов плодородия. Регулирование режима почвенной влаги применительно к различным почвам, в целях получения наивысших урожаев с них, служит основой разработки рациональной агротехники. Поэтому определение влажности почвы имеет большое практическое значение и является наиболее распространенным почвенным анализом. Многочисленная сеть опытных станций агрометеорологической службы ежедекадно определяет влажность почвы до глубины одного метра под разными сельскохозяйственными культурами. На опытных станциях и в хатах-лабораториях определяют влажность для производственных целей — установления времени обработки почв, срока полива и т. п.

В данном разделе излагаются способы взятия образцов почвы на влажность, способы выражения почвенной влажности с агрономической оценкой запасов влаги и методы определения общей влажности почвы в поле и лаборатории.

#### Взятие образца почвы на влажность

Определение влажности почвы необходимо проводить с учетом генетических горизонтов почвы и геологических напластований. Сначала производят морфологическое описание почвы с тем, чтобы сообразно генетическим горизонтам почвы наметить

глубины взятия проб на влажность. Образцы почвы на влажность можно брать из открытых разрезов, очищая стенку разреза перед взятием проб на 4—5 см или же выемку проб производят бурами.

Контроль взятия образцов в поверхностном слое пятикратный, глубже — трехкратный или двухкратный. При систематических и массовых определениях контрольные пробы берутся в одну сушилку. Существует несколько конструкций буров для выемки почвенных проб на влажность.

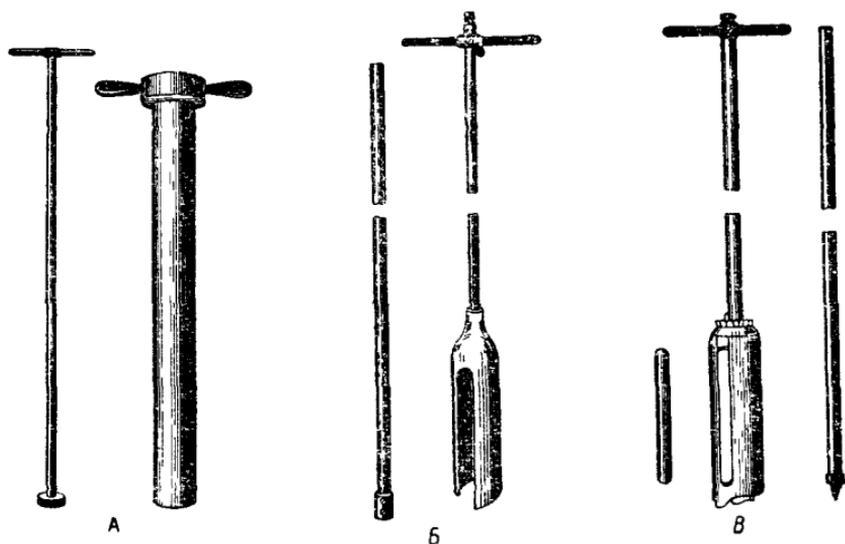


Рис. 50. Буры для взятия проб почвы на влажность: А — бур Качинского; Б — бур Измайльского, В — бур Некрасова

Бур Измайльского (рис. 50, Б). Ствол бура изготовляется из полосового четырехгранного железа с шириною грани в 2—2,5 см и состоит из нескольких, длиною 1,5 м, штанг, скрепляющихся винтовой резьбой или болтами.

Этим буром можно бурить почву на глубину до 20 м. Отъемная ручка привинчивается к верхней части бура. К нижнему концу бура припаян металлический цилиндр длиной 20 см и в диаметре 5 см, оканчивающийся винтообразной изогнутой, заостренной ложкой, ввинчивающейся в почву. Почва при этом разрыхляется. Через весь цилиндр проходит щель шириною в 2 см, из нижней части цилиндра из слоя высотой в 10 см через щель берется образец почвы на влажность.

Форму режущей части бура Качинский изменил на загнутый клин, а штанги по предложению М. К. Мельниковой стали изготовлять из полых труб диаметром 2—2,5 см (используемых при газопроводах), что намного уменьшило вес бура, увеличило его устойчивость, облегчило погружение его в почву и выемку из нее. Один рабочий без особого труда может бурить до 3—4 м. Бур

этот широко используется при массовых определениях влажности на гидрометеорологических станциях и в других учреждениях.

Бур системы Н. А. Качинского (рис. 50, А) представляет собою железную трубу диаметром 4—5 см. Нижняя режущая часть трубы заострена и имеет диаметр на 2 мм меньше, что устраняет прессование образца. На верхнюю часть трубы насаживается головка с плечиками для ручек. Пробы берутся последовательно бурами различной длины: 0,65; 1,25 и 2,25 м. В двух последних бурах на нижнюю часть надевается насадка для облегчения извлечения бура из почвы. При взятии проб с глубины больше 50 см бур погружается в почву ударами деревянной колотушки по головке бура. Бур трудно погружается на глубину больше метра и с большими усилиями извлекается обратно. Достоинство его в том, что взятая проба мало деформируется, поэтому даже при высокой влажности вода из образца почти не выжимается.

Бур Некрасова (рис. 50, В) состоит из цилиндра для взятия пробы почвы, основной и дополнительной штанг. Штанги бура изготовляют из полой или глухой трубы длиной 100—160 см. На верхнюю часть основной штанги бура насаживают муфту, в отверстия которой вставляют ручку; нижняя часть штанги имеет винтовую резьбу, на которую навинчивают почвенный цилиндр.

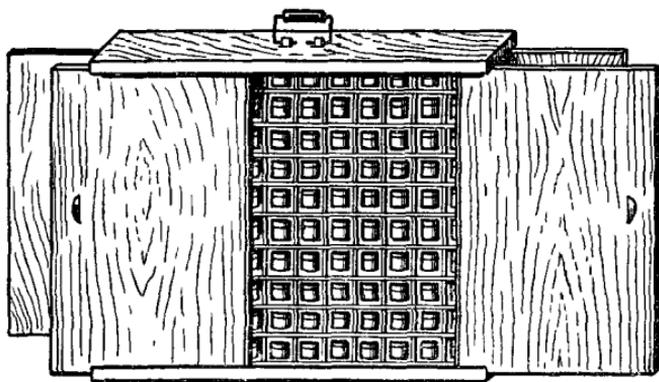


Рис. 51. Ящик для сушильных стаканчиков

Цилиндр для почвы изготовляется из нержавеющей стали. Высота его 11 см, внутренний диаметр — 5 см, в верхней части имеет винтовую резьбу, с помощью которой привинчивается к нижнему концу штанги. Нижняя часть цилиндра имеет внешнюю резьбу, к ней привинчивается режущая часть бура, представляющая собой кольцо высотой в 5 см, скошенное в нижней части на конус так, чтобы внутренний диаметр на 1 мм был уже внутреннего диаметра цилиндра для почвы. Кольцо с нижней стороны снабжено двумя острыми зубцами для подрезания почвы.

К бурю изготавливают штанги длиной 1 — 1,5 м, которые навинчиваются на верхнюю часть предыдущей штанги, что позволяет брать пробы на влажность почвы с больших глубин.

Пробы из бура берутся стамеской во взвешенный сушильный бюкс. Бюкс плотно закрывается, вытирается полотенцем и устанавливается в специально изготовленный ящик (рис. 51). В ящике сушилки прикрываются полотенцем. Во время доставки ящика с пробами в лабораторию его прикрывают клеенкой или мешковиной.

## СПОСОБЫ ВЫРАЖЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Содержание влаги вычисляют в процентах от веса абсолютно сухой почвы по формуле

$$W \% = \frac{a}{b} \cdot 100, \quad (50)$$

где  $W$  — процентное содержание влаги,  $a$  — количество воды в образце, определенное тем или иным методом;  $b$  — вес абсолютно сухой почвы.

Общее содержание влаги в почве называют абсолютной влажностью.

Иногда необходимо влажность вычислять в процентах к объему почвы:

$$W_v \% = W \% \cdot d_v, \quad (51)$$

где  $W_v$  — влажность в процентах от объема почвы,  $d_v$  — удельный вес скелета почвы,  $W$  — влажность в процентах от веса почвы.

В связи с тем, что выпадающие осадки измеряются в мм водного столба, целесообразно запасы влаги в почве выражать в этих же единицах. Вычисление производится по формуле:

$$W_{мм} = \frac{W \% \cdot h \cdot d_v \cdot 10}{100}, \quad (52)$$

где  $W_{мм}$  — влажность в мм в слое почвы толщиной  $= h$  см, остальные обозначения те же, что и в предыдущих расчетах.

Запасы воды в исследуемой толще почвы в практике выражают в тоннах или кубометрах на га ( $W м^3$ ) путем умножения величины влажности  $W$  на коэффициент 10

$$W м^3 = W_{мм} \cdot 10. \quad (53)$$

Для вычисления запаса влаги в мм или  $м^3/га$  в метровой или двухметровой толще почвы производят вычисления по отдельным горизонтам, в которых величины  $d_v$  различны, и затем суммируют для общего слоя (табл. 9 приложения).

Подобно относительной влажности воздуха, вычисляют относительную влажность почвы.

Относительная влажность есть отношение содержания влаги в данный момент к количеству воды, насыщающей почву до ее влагоемкости.

Если в данный момент влажность почвы  $W\%$ , общая влагоемкость  $= W_{\text{общ}}\%$ , то относительная влажность

$$W_{\text{отн}}\% = \frac{W\% \cdot 100}{W_{\text{общ}}}. \quad (54)$$

Относительная влажность дает представление о степени насыщения почвы водой и позволяет сравнивать влажность почв, отличающихся влагоемкостью. Если взять супесчаную почву с влагоемкостью  $10\%$ , то при влажности в  $5\%$  ее относительная влажность

$$W_{\text{отн}} = \frac{5}{10} \cdot 100 = 50\%.$$

Тяжелосуглинистая почва с влагоемкостью  $30\%$  будет иметь такую же степень смоченности при абсолютной влажности в  $15\%$ .

$$W_{\text{отн}} = \frac{15}{30} \cdot 100 = 50\%.$$

Таким образом, несмотря на резко различную общую влажность, степень смоченности изучаемых почв оказалась одинаковой.

Вычисление продуктивной влаги в слое почвы. Продуктивной влагой называют все количество воды сверх влажности завядания. Только при влажности выше влажности завядания растения могут расти. Пусть при определении влажности почвы в поле было установлено, что в слое  $0—50$  см влажность  $85$  мм водного столба. Известно также, что влажность завядания в этом слое почвы равняется  $45$  мм. Тогда запасы продуктивной влаги в этом слое составляют  $40$  мм. Продуктивную влагу можно выражать и в процентах.

Диапазон активной (продуктивной) влаги. Наивысшему увлажнению почвы в полевых условиях соответствует общая ( $W_{\text{общ}}$ ) или наименьшая влагоемкость, нижним пределом доступной или активной влаги является влажность завядания  $W_{\text{зав}}$ . Разница между названными пределами увлажнения дает диапазон активной влаги в почве

$$W_{\partial} = W_{\text{общ}} - W_{\text{зав}}. \quad (55)$$

Если в вышеприведенной тяжелосуглинистой почве влажность завядания  $= 12\%$ , а общая влагоемкость равна  $30$ , то диапазон активной влаги  $W_{\partial} = 30 - 12 = 18$ .

Величину диапазона активной влаги можно выражать в мм и в процентах. Он характеризует максимально возможное количество продуктивной влаги в почве.

Оценка запасов продуктивной влаги. В первый период развития растений решающее значение имеют запасы влаги в пахотном слое мощностью  $0—20$  см, в дальнейшем растения потребляют влагу слоя почвы метровой толщины, а в период засух или при высоких урожаях используют запасы влаги с глубины до двух метров.

Оценка запасов продуктивной влаги производится по следующей шкале:

В слое 0—20 см	
Запасы хорошие . . . . .	40 мм
удовлетворительные . . . . .	20—40 мм
неудовлетворительные . . . . .	< 20 мм
В слое 0—100 см	
Запасы очень хорошие . . . . .	> 160 мм
хорошие . . . . .	160—130 мм
удовлетворительные . . . . .	130—90 мм
плохие . . . . .	90—60 мм
очень плохие . . . . .	< 60 мм

### Определение влажности почвы

Существующие методы определения общей влажности можно разделить на прямые методы, при которых количество воды определяется непосредственно, и косвенные, при которых оно вычисляется посредством каких-либо коэффициентов или градуировок.

**Непосредственный учет воды.** Исследуемое вещество нагревается до определенной температуры, а выделяющиеся при этом пары воды конденсируются и измеряются. Таким способом А. Н. Лебедев и Т. Залыгин определяли воду в органических веществах, а Суприенко в почве. При этом был констатирован факт, что в процессе сушки, кроме паров воды, выделяется еще ряд продуктов, изменяющих как гитр кислоты, так и щелочи.

Определение влажности методом дистилляции. Влажность определяется путем перегонки исследуемого вещества с какой-либо индифферентной жидкостью, не смешивающейся с водой (керосин, толуол, бензол, ксилол и др.). Пары кипящего медума увлекают с собой пары воды, которые, конденсируясь в холодильнике, поступают в приемник. Разграничение жидкости происходит вследствие разницы их удельных весов. Основные методические требования при этом способе сводятся к следующему: 1) абсолютная чистота прибора; 2) конструкция аппарата должна быть

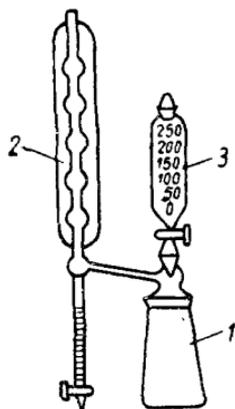


Рис. 52. Прибор для определения влажности методом дистилляции:

1 — колба для перегонки, 2 — холодильник с приемником, 3 — делительная воронка

такова, чтобы вода не задерживалась по пути движения в измерительный приемник; 3) нерастворимость воды в медиуме; 4) для каждого вещества необходимо подобрать соответствующий реактив.

Из всех медиумов, рекомендуемых в практике для почвы, наиболее успешно может быть применен толуол, кипящий при 112°C. Анализ можно производить в приборе, показанном на рис. 52. Аппарат состоит из колбы для перегонки, холодильника с приемником и делительной воронки для медиума. Методы возгонки применялись главным образом для определения влажности в органических веществах, но пригодны и для определения влажности почвы.

Недостатки метода: а) ксилол, толуол и другие образуют прочные эмульсии с водой; б) материал лежит на дне колбы прибора и пригорает; в) громоздкая аппаратура. Можно применять нелетучие дистилляты, сохраняющие при отгонке влаги свой вес — хлопковое масло, подсолнечное масло, парафин и др. (Кульман, 1938). Тогда дистилляцию можно вести в открытых металлических бюксах. При этом содержание воды определяется по потере в весе. Расход масла составляет 3—4 мл на одно определение.

**Косвенные методы определения влажности.** Качественные методы. Влажность почвы можно определить на ощупь. Для полевых исследований рекомендуется следующая шкала увлажнения почв: а) мокрая почва — при копании почвенного разреза сочится вода; б) сырая — вода не сочится, но приложенный лист непроклеенной бумаги быстро промокает, а при сжатии в руке почва превращается в тестообразную массу; в) влажная — куски почв требуют незначительного усилия при сжатии, приложенная фильтровальная бумага при этом увлажняется; г) свежая почва производит ощущение слегка прохладной массы, воды в капельно-жидком состоянии при этом нет, бумага не промокает; д) сухая — пылит.

**Метод горячей сушки.** Этот метод с давних пор и по настоящее время является самым распространенным в почвенной практике. С помощью его проведены все основные работы по влажности почвы (Г. Н. Высоцкий, В. С. Ротмистров, А. А. Измаильский) и в настоящее время он является основным. К сожалению, приходится отметить, что и теперь и прежде сушка проводилась различными исследователями по-разному: при различных температурах, на водяной бане или в термостате, с применением эксикатора и без него. Желательно выдерживать одинаковую технику анализа: в предварительно взвешенный сушильный стаканчик помещают среднюю пробу почвы от 8 до 20 г. Сырую почву взвешивают дважды в целях контроля.

Взвешивание почвы при определениях полевой влажности производится на технико-химических весах с точностью до 0,01 г; при необходимости более точных определений, особенно

в случае низких влажностей, взвешивать следует на аналитических весах. Проба сушится в термостате (рис. 53) до постоянного веса при 100—105°C. Песчаные и супесчаные почвы можно сушить при 150—160°. Существующие сушильные шкафы № 2, шкаф типа 12-НА и другие при нагревании показывают разную температуру на верхней и нижней полке; внизу она обычно на несколько градусов выше. Заданную температуру в термостате

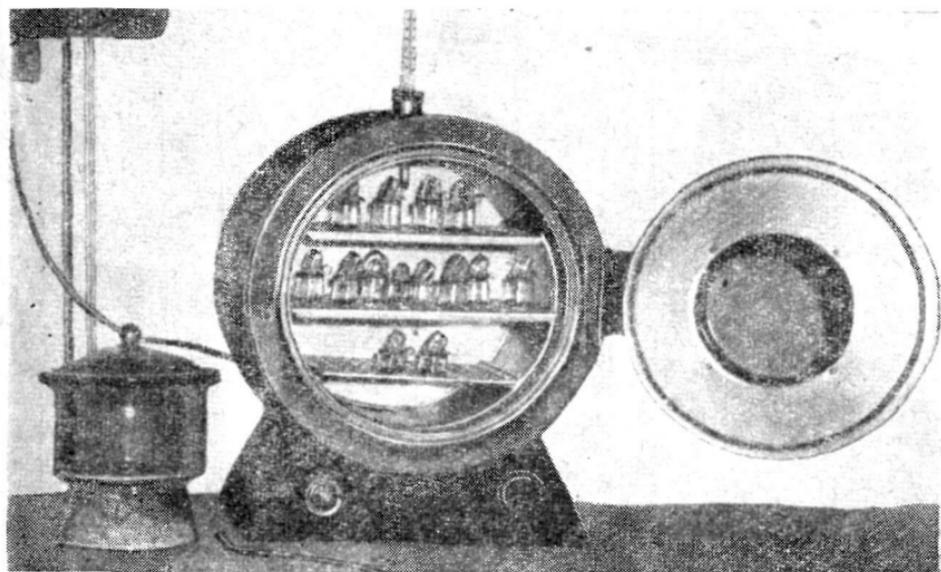


Рис. 53. Шкаф для сушки образцов почвы при определении влажности

следует поддерживать по термометру верхней полки и на нижнюю полку ставить образцы почвы негумифицированные или песчаные, влажность которых мало изменяется от изменения температуры. При гигроскопической влажности длительность первой сушки 3 час, при больших влажностях — 5—8 час. Контрольную сушку следует проводить 1 час при низких влажностях и 2 час при высоких влажностях. После сушки пробы помещают в эксикатор с  $\text{CaCl}_2$  на дне, охлаждают 20—30 мин и затем взвешивают. Расхождения в весе после повторной сушки при высокой влажности допускаются не больше 0,05 г, при средней и низкой влажности, а также в песчаных почвах —  $< 0,03$  г. При взвешивании на аналитических весах  $< 0,003$  г. В случае невозможности охлаждения пробы в эксикаторе не следует затягивать взвешивание после охлаждения и категорически нельзя оставлять взвешивание до следующего дня.

Хронометраж времени показывает, что на одно определение при термостатном методе требуется времени в несколько раз меньше, чем при методе сушки над водоотнимающими веществами или при химических методах определения влажности. Этот

метод тем более удобен, что позволяет вести определение одновременно с большим количеством образцов (100—200), тогда как почти все другие методы этого не допускают. Время определения влажности можно значительно сократить, применяя автоматические весы.

При определении влажности записи производятся по форме, приведенной в табл. 28.

Таблица 28

Форма записи при определении влажности почвы

Название почвы	Горизонт и глубина в см	Удельный вес скелета почвы $d_v$	N сушильного стакана	Вес сушильного стакана	Вес стака- на+сы- рой почвы		Вес стаканчика с почвой после сушки			Вес воды в навеске	Вес абс. сухой навески	Влаж- ность	
					I	II (контроль)	I	II	III			в %	в мм
Обыкно- венный чернозем	1,(0—10)	1,37	20	23,12	51,10	51,10	49,25	49,12	49,13	1,98	26,00	7,62	10,21

*Вычисление:* количество воды во взятой пробе  $a$  определяют по разности веса в графе 6 и веса стаканчика с почвой после сушки (графы 9—10). Абсолютно сухую навеску почвы  $b$  вычисляют как разницу веса стаканчика с почвой после сушки (графы 9—10) и веса пустого стаканчика (графа 5). Процентное содержание влаги

$$W\% = \frac{a}{b} \cdot 100, \quad (56)$$

запас воды в мм в толще почвы —  $h = 0 - 10$  см:

$$W_{мм} = \frac{W\% d_v \cdot h \cdot 10}{100}, \quad (57)$$

где  $d_v$  — удельный вес скелета почвы получают как среднюю величину или определяют непосредственно.

В последнее время предложен ряд приемов, совершенствующих метод определения влажности нагреванием. Так, рекомендуют производить сушку в термостате при высоких температурах (Бирюкова, 1935) при пропускании сухого воздуха или лучше инертного газа (азот, водород), а также сушить в вакуум-термостате, что позволяет снизить длительность сушки до 1—1,5 час, и др.

Интересным в этом отношении является прибор Грубба. Сушка в нем производится горячим воздухом. В приборе имеются специальные весы, номограмма которых указывает сразу

процент влажности. Производительность прибора 40—60 определений в час.

Сушка инфракрасными лучами. Метод сушки инфракрасными лучами значительно сокращает время сушки (4—8 мин), он прост, дешев, а его аппаратура отличается малыми габаритами. Способ этот нов, поэтому конструкции сушильных установок еще недостаточно разработаны. Испытан этот метод при анализах почв (В. Б. Замятина и Т. Н. Черненко, 1952) и торфа (А. П. Поляничева и С. М. Саватюгина, 1952, Е. Е. Сторчак, 1953).

В качестве источника тепла применяется лампа инфракрасного излучения на 500 вт, которое интенсивно поглощается водой исследуемого вещества.

Лампа (рис. 54) закрепляется на штативе и ставится на асбестовую пластинку. Высота центра лампы над асбестом 5—10 см. При включении лампы на асбесте обрисовывается освещенный круг, который фиксируется карандашом.

Навеска почвы в 10 г, рассыпанная тонким слоем в чашечке из нержавеющей стали или в низком и широком алюминиевом стаканчике, помещается в контур, освещаемый лампой. Под одной лампой можно сушить 4—6 образцов одновременно. Почвы безгумусные сушат 7 мин, гумусные (черноземные) — 3, так как при более длительном облучении происходит сгорание гумуса. Точность определения 3—5% от определяемой величины влажности. Форма расчета и записи приведены в табл. 28. Данный метод можно применять, когда требуется срочно узнать влажность.

Метод горящего спирта предложен Боуякосом (1931) и многократно проверен русскими почвоведом: А. Г. Дояренко (1937), Колошников (1939), П. В. Иванов (1953) и др.

*Необходимое оборудование для определения:* металлическая чашка на ножках с сетчатым дном диаметром в 5 см, вторая металлическая чашка диаметром 6—7 см. В первую чашку на

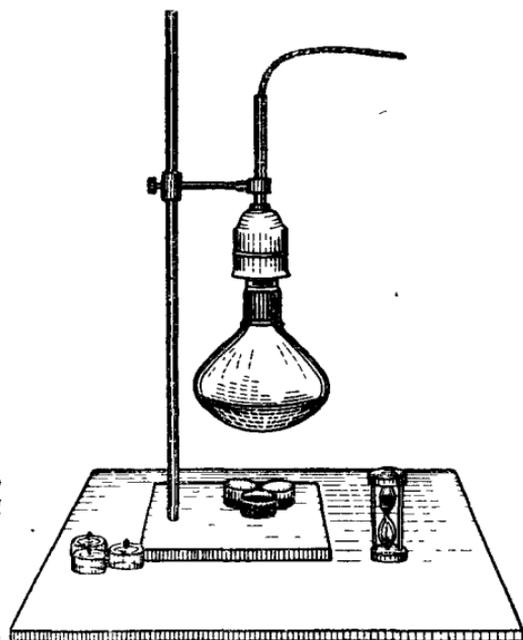


Рис. 54. Установка для определения влажности почвы с применением лампы инфракрасного излучения

сетчатое дно кладется фильтр, чашка вставляется во вторую, затем они взвешиваются. Можно использовать и обычный сушильный алюминиевый стаканчик диаметром 5 и высотой 4 см, вставляя внутрь его треножник, покрытый металлической сеткой с отверстиями 0,1 мм, через которые почва не просыпается и без фильтра. Затем берется навеска почвы 20—25 г и помещается на сетку. К почве прибавляют 25 мл метилового спирта, часть которого стекает в нижнюю чашку. Образец несколько раз заливают спиртом и сжигают его, доводя вес почвы до постоянного, на что расходуют 50—70 мл спирта. Температура горящего спирта 130—160°C. Метод применим к почвам, содержащим не более 11% гумуса. Испытаны этиловый, метиловый, пропиловый и древесный спирты, давшие примерно одинаковые результаты.

При наличии соответствующего оборудования и реактивов этот метод можно применять в экспедиционных условиях.

Метод холодной сушки. Почва обезвоживается поглотителями:  $H_2SO_4$ ,  $CaCl_2$ ,  $P_2O_5$  и др. Из них  $P_2O_5$  и  $H_2SO_4$  требуют особо осторожного обращения.  $H_2SO_4$  испаряется даже при обыкновенной температуре и может поглощаться исследуемым веществом. Лучше пользоваться  $P_2O_5$ .

*Методика работы.* Пробу почвы 8—15 г (лучше меньше) в стеклянном сушильном стаканчике помещают в вакуум-эксикатор (см. рис. 66), на дне которого находится  $P_2O_5$ . Из эксикатора выкачивают воздух до 1—2 см рт. ст. Затем эксикатор ставят на 4 час на кипящую водяную баню, после чего сушка считается законченной. Если сушить почву без нагревания и вакуума, то длительность сушки — 20—30 дней.

Метод сушки над  $P_2O_5$  Гедройц (1933) и другие считают наиболее точным. Им можно пользоваться как эталоном для характеристики других методов определения влажности. Сравнение величин влажности, полученных методами горячего и холодного высушивания, показало, что метод горячего высушивания дает результаты, превышающие истинное содержание воды в почве на 1% (по сравнению с методом высушивания над  $P_2O_5$ ) (см. табл. 29).

Это разница в случае гумусовых и глинистых почв больше и зависит от температуры сушки. При увеличении температуры потеря в весе для одной и той же почвы возрастает. Сюда же входит и ошибка, которая происходит от замены более тяжелого холодного воздуха в сушилке легким, нагретым.

**Весовые методы определения влажности почвы.** Пикнометрический метод. Навески почвы погружают в пикнометр, заливают до метки водой, после чего определяют ее вес в воде —  $P_1$ . Вес абсолютно сухой почвы —  $B$  вычисляется по формуле:

$$B = \frac{P_1 \cdot d_1}{d_1 - 1}, \quad (58)$$

где  $d_1$  — удельный вес твердой фазы почвы, заранее установлен-

## Данные определения влажности почвы горячей и холодной сушкой

Глубина взятой пробы в см	Влажность в % от сухой почвы		Разница $a-b$
	сушка при 105°C — $a$	сушка над $P_2O_5$ — $q$	
Южный 0—3 . .	11,71	10,67	1,04
чернозем 26 . .	19,80	18,67	0,93
76 . .	14,69	14,08	0,61
Кварцевый песок	0,70	0,70	0

ный для данной почвы. Затем нетрудно вычислить процент влажности  $W\%$

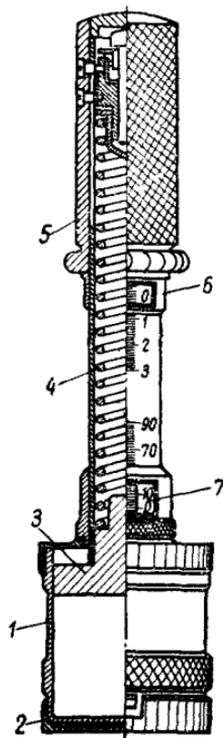
$$W\% = \frac{P_1 - B}{B} \cdot 100. \quad (59)$$

Впервые этот метод применил Дояренко, позже над ним работал П. И. Андрианов (1925), предложивший специальный пикнометр для определения влажности почвы, еще позже Н. М. Майборода (1958) и др. Для полевых определений влажности почвы метод дает вполне приемлемую точность. Метод удобен отсутствием сушки.

**Измерение влажности по изменению объема почвы.** Метод разработан Ф. К. Колясевым (1950). В основу его положено изменение объема почвы в зависимости от влагосодержания. Предложенный авторами прибор (рис. 55) состоит из металлического стакана (1) сечением 17,3 см<sup>2</sup>, высотой 4,3 см и объемом 74,5 см<sup>3</sup>. На дне стакана проделано 5 отверстий диаметром в 1 мм. Металлический колпачок с зазором и выходным отверстием надевается на дно стакана — 2.

Стакан навинчивается на полую трубку, соединенную с поршнем. Внутри трубки находится пружина мощностью до 25 кг, которая упирается одним концом в поршень, другим — в ручку прибора. На трубу-

Рис. 55. Прибор Колясева для определения влажности почв: 1 — металлический стакан, 2 — металлический колпачок, 3 — поршень, 4 — градуированная пружина, 5 — ручка прибора, 6 — нониус первый, 7 — нониус второй



ке нанесены деления для отсчета величины приложенного давления и отдельно для учета усадки почвы.

**Техника определения:** стаканчик заполняется почвой послой-

но при постоянном давлении металлическим цилиндром веса 1,7 кг, т. е. 0,1 кг на 1 см<sup>2</sup>, до кольцевой отметки внутри стакана. Затем его вставляют в трубку и с помощью пружины оказывают на 30—35 сек давление 17,3 кг (1 кг/см<sup>2</sup>), отсчитываемое по нониусу.

По второму нониусу определяется уменьшение объема по высоте  $\Delta h$  с точностью до 0,1 мм. Затем вычисляется

$$\frac{\Delta h}{h},$$

где  $h$  — первоначальная высота образца почвы в приборе (или объем почвы);

$\Delta h$  — изменение высоты (или объема) почвы после прессования. Предварительно для каждого генетического горизонта почвы строится тарировочная кривая изменения

$$\frac{\Delta V}{V} \text{ или } \frac{\Delta h}{h}$$

в зависимости от влажности. Так как кривая обычно дает перегиб после некоторого предела увлажнения, то для того, чтобы решить, по какую сторону от перегиба брать влажность, нужно провести контрольное определение, прибавляя к пробе 0,5—1 мл воды. Если при этом определение покажет повышенное значение

$$\frac{\Delta V}{V},$$

то нужно отсчитывать влажность по абсциссе до перелома, если значение пониженное — после перелома кривой.

Данные влажности почвы, полученные прибором Колясева, близки к результатам, полученным методом высушивания, что проверено рядом авторов — В. В. Акимцевым, Кудрявцевым и Садименко (1955), С. Яковлевым (1954) и др.

Метод интересен тем, что не требует ни сушки, ни весов, поэтому весьма перспективен для работы в экспедиционных условиях.

**Определение влажности по изменению концентрации реагента.** При определении влажности этим методом влажный материал обрабатывается реагентом, способным изменить свою концентрацию от влаги исследуемого вещества.

**Спиртовой метод.** Навеска почвы обрабатывается спиртом, крепость которого должна быть не менее 80%. Концентрация спирта измеряется специальным ареометром до и после соприкосновения с почвой ( $t$  и  $t_1$ ). Количество воды в навеске ( $x$ ) вычисляется по формуле

$$x = \frac{a(t - t_1)}{t_1},$$

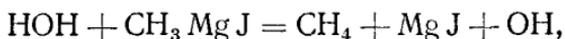
где  $a$  — вес взятого спирта.

Присутствие большого количества солей в почве требует некоторых изменений в устройстве ареометра.

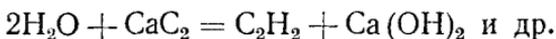
**Химический метод.** Исследуемое вещество обрабатывается каким-нибудь химическим реагентом. Вода при этом разлагается с образованием нового продукта, по количеству которого с помощью соответствующих градуировок определяют количество воды. Например, при действии металлического натрия выделяется водород:



при обработке метилмагниййодидом — метан:



от действия карбида кальция выделяется ацетилен:



Из перечисленных реагентов наиболее доступен карбид кальция.

Карбидный метод определения влажности имеет многостороннее применение: он используется при определении влажности в газах, в порохе, в органических веществах. Для определения влажности почвы его применяли В. Бутов (1926), В. Сибирский (1935), А. Ф. Вадюнина (1936). В зависимости от способа учета продукта реакции — ацетилена, можно выделить несколько вариантов этого метода: гравиметрический, в котором определяется вес ацетилена, волюметрический (учитывается объем ацетилена), барометрический, при котором количество выделившегося газа определяется по его давлению. Наконец, количество ацетилена можно определить колориметрически и путем титрования, пользуясь соответствующими реактивами. Два последних способа не получили распространения.

**Барометрический метод.** Определение влажности осуществляют следующим путем: навеску исследуемого вещества и тонкостенную ампулу с карбидом кальция помещают в герметически закрывающуюся толстостенную склянку, в пробке которой укрепляют манометр. Прибор сильно встряхивают, ампула разбивается. Карбид кальция реагирует с водой вещества. На шкале манометра, благодаря заранее проведенной градуировке, получают непосредственно процент влажности в данном веществе. Метод еще разрабатывают, результаты при испытаниях получают удовлетворительные.

**Волюметрический способ.** В принципе он позволяет производить определения с большой точностью. 1 см<sup>3</sup> газа получается при разложении 0,00195 г воды. Поэтому даже незначительное содержание воды в навеске дает вполне учитываемый объем ацетилена. Однако использовать этот метод для массовых определений влажности почвы затруднительно ввиду громоздкости аппаратуры и сравнительной длительности определения.

**Карбидный весовой метод.** Для определения влажности почвы предлагается прибор Вадюниной, который состоит из двухгорлой склянки (рис. 56), к широкому горлу которой пришлифовывается стеклянная трубка конусообразной формы. Верхнее

и нижнее отверстие трубки закрываются каучуковыми пробками. Через верхнюю пробку проходит металлический стержень для выталкивания нижней пробки. Во второе узкое горло склянки вставляется тонкая стеклянная трубка с клапаном Бунзена на конце.

Перед определением большая трубка наполняется молотым карбидом кальция, которого берется в 2—3 раза больше по весу, чем навеска почвы. В узкую трубочку помещается гранулированный карбид кальция. Прибор взвешивается. Затем на дно его помещается навеска исследуемой почвы 10—15 г, вес которой определяют по разности. Пробка выталкивается стержнем, карбид кальция высыпается. Реакция начинается моментально с выделением большого количества тепла. Часть паров воды увлекается выделяющимся ацетиленом и разлагается в трубке с гранулированным карбидом кальция. Через клапан Бунзена ацетилен выходит наружу. Ацетилен — взрывчатый газ и смесь его с воздухом огнеопасна. Кроме того, он обладает наркотическим свойством. Поэтому прибор при работе следует помещать в вытяжной шкаф. Практически реакция проходит через 15—20 мин. В случае грубых, механически прочных структурных отдельностей и большой при

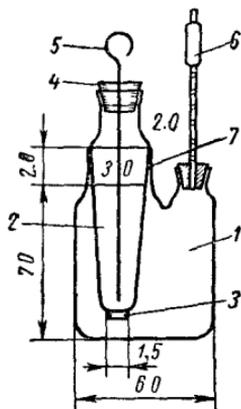
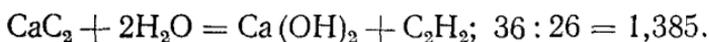


Рис. 56. Прибор Вадюниной:

1 — двугорлая склянка, 2 — стеклянная трубка конусообразной формы, 3, 4 — каучуковые пробки, 5 — металлический стержень для выталкивания пробки, 6 — клапан Бунзена, 7 — шлиф

этом влажности продолжительность реакции увеличивается до 10 час. Для того чтобы карбид полностью прореагировал с водой, прибор нужно как можно чаще встряхивать. После реакции определяют вес выделившегося ацетилена, который, по заранее составленной градуированной таблице, переводят на вес воды. Теоретически 1 г  $C_2H_2$  эквивалентен 1,385 г воды, согласно реакции:



Практически различные исследователи получают коэффициенты, несколько уклоняющиеся от теоретической величины, что зависит от различия способов установления коэффициента и от качества карбида. Данные, полученные нами для различных почв в лаборатории, а для подзолистой почвы — и в полевых условиях, показали, что результаты карбидного метода несколько занижены по сравнению с результатами, полученными методом высушивания. Разница колеблется от 0,1 до 1 и в редких случаях доходит до 2,5%, особенно при больших навесках с высокой влажностью или при безгумусной, глыбистой почве. В последнем случае комки почвы покрываются корочкой из  $Ca(OH)_2$ .

и реакция затягивается или не доходит до конца. Необходимо при этом обращать внимание на тщательное перемешивание карбида с почвой.

Достоинства карбидного метода: прибор простой, определение быстрое, реактив дешевый, отсутствует процесс сушки. Если все эти достоинства принять во внимание, то необходимо продолжить изучение карбидного весового метода. В настоящем виде его можно рекомендовать для полевых определений влажности, когда не требуется большой степени точности.

\* \* **Электрометрические методы.** Электрометрические методы измерения влажности почвы стали применять с конца прошлого столетия Уитней (1897), Гарднер и Л. Бриггс (1899, 1897). Возможность дистанционных измерений без высушивания и взвешивания привлекали внимание ряда исследователей к этим методам.

Кондуктометрические методы основаны на измерении электрического сопротивления с последующим вычислением электропроводности  $E$  как величины, обратной сопротивлению

$$E = \frac{1}{R} \quad (60)$$

исследуемого материала. Диэлектрические или емкостные методы основаны на учете диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

Приборы, используемые для измерений, состоят, в основном, из датчика и измерительного устройства. Измерительное устройство включает источник питания и само измерительное приспособление.

**Кондуктометрический метод.** Электросопротивление почв и грунтов тем меньше, чем выше в них содержание влаги. На его величину оказывают воздействие и другие факторы: содержание солей, температура и плотность почвы, характер контакта датчика прибора с почвой. Поэтому при определении влажности кондуктометрическим методом необходимо влияние последних факторов снизить или сделать постоянным.

Градуировочные кривые изменения сопротивления или электропроводности почвы в зависимости от влажности устанавливают для каждой почвенной разности и генетического горизонта почвы с учетом концентрации солей в них. С. И. Долгов искусственно насыщал почву NaCl, чтобы исключить влияние концентрации солей в почве; Боуякос предложил электроды заделывать в гипсовые блоки, которые служат буфером. Плотность почвы в опыте постоянна; измеренное сопротивление  $R_t$  приводят к одной и той же температуре, например, к  $15^\circ$  по формуле:

$$R_{15} = \frac{R_t}{1 + \alpha \Delta t}, \quad (61)$$

где  $R_t$  — сопротивление при  $t^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t = t^\circ - 15^\circ$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент, равный, в среднем, 0,029 в пределах измерения температур от  $-20^\circ$  до  $+40^\circ\text{C}$ ;  $t^\circ$  — температура во время опыта.

Кондуктометрический метод может быть использован для определения влажности материала в лаборатории, для определения электропроводности почв при общей влагоемкости и для определения ионной концентрации солей в почвенном растворе.

В полевых условиях он может быть рекомендован для стационарных наблюдений над режимом влажности почвы. Электросопротивление резко возрастает при замерзании воды в почве, поэтому этим методом можно пользоваться для определения глубины промерзания почв. Кроме того, при изучении водопроницаемости и водоподъемной способности величиной сопротивления почвы пользуются для установления границы смачивания. При переходе от влажной к сухой почве сопротивление резко возрастает.

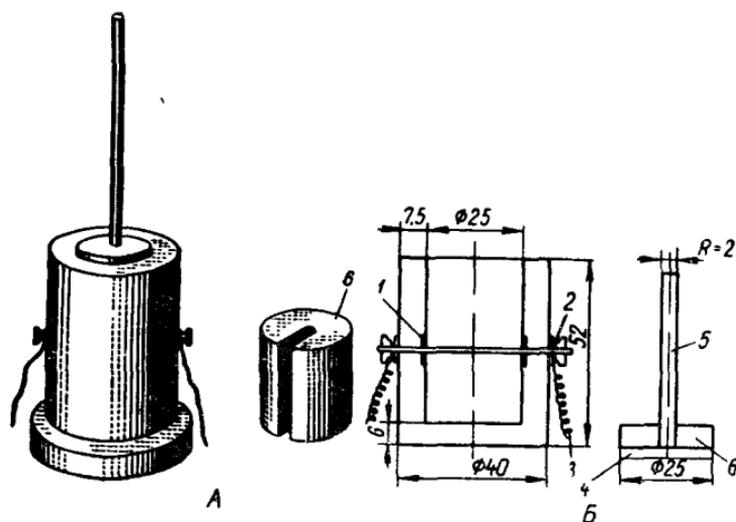


Рис. 57. Прибор для определения сопротивления почвы.  
А — общий вид прибора; Б — схема прибора:

1 — платиновые электроды, 2 — винтики к клеммам, 3 — провода, 4 — крышка цилиндра, 5 — ручка к крышке цилиндра, 6 — груз для уплотнения почвы

*Датчики для измерения электросопротивления почвы.* В качестве датчиков в кондуктометрическом методе используются электроды разной формы, изготавливаемые из платины, нержавеющей стали, угля и других материалов. Электроды помещаются в сосуд или используются в виде вилки отдельно, применяются также специальные электроблоки.

В лаборатории физики почв МГУ для определения электросопротивления почв использован прибор (рис. 57), состоящий из эбонитового сосуда цилиндрической формы. На противоположных сторонах боковой поверхности цилиндра, посередине, закреплены электроды — 1 из платины или из нержавеющей стали, припаянные к клеммам — 2. К клеммам присоединяют про-

вода — 3, идущие к измерительному узлу. Крышка цилиндра — 4 имеет ручку в виде стержня — 5, на крышке укреплен груз для уплотнения почвы — 6.

Используют груз весом 250 г. Удельное давление на почву при площади сечения цилиндра 5 см<sup>2</sup> одной гири в 250 г — 0,05 кг/см<sup>2</sup>, двух — 0,1 кг/см<sup>2</sup>.

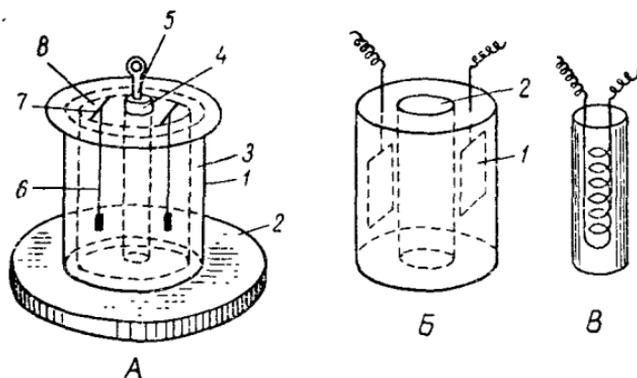


Рис. 58. Электроблоки, применяемые при измерении сопротивления почвы.

*А* — форма для изготовления блоков, используемых в полевых исследованиях:

1 — металлический цилиндр, 2 — резиновая плита, 3 — резиновая прокладка, 4 — каучуковая трубка, 5 — металлический стержень, 6 — электроды, 7 — зажимы для электродов, 8 — отверстие для заливки гипсового раствора;

*Б* — гипсовый блок, используемый при полевых исследованиях:

1 — электроды, 2 — отверстие в блоке;

*В* — гипсовый блок, используемый в лабораторных исследованиях

Почву можно поместить в стаканчик из стекла или другого материала, покрытого с внутренней стороны изоляционным слоем. Если электроды не прикреплены к стенкам стакана, их вводят через крышку, в которой должны быть специальные отверстия.

**Электроблоки.** Металлические оголенные электроды плохо контактируют с почвой, особенно при полевых стационарных измерениях. Боуякос (1940) предложил помещать электроды в гипс, нейлон или стеклянную вату, влажность которых устанавливается наравне с почвенной при их контакте.

Электрод цилиндрической формы или в виде пластинки помещают внутрь блока соответствующей формы, изготовленного из обожженного гипса или другого материала. Для полевых стационарных измерений можно воспользоваться формой *А* (рис. 58). Болванка представляет собой металлический цилиндр — 1 с резиновой прокладкой — 3 по внутренней стенке. В центре его закрепляют металлический стержень — 5, вставленный в каучуковую трубку — 4. Зажимами — 7 прикрепляют

к крышке болванки электроды — 6. Цилиндр ставят на резино-вую плиту — 2.

Алебастр, просеянный через сито с отверстиями 0,5 мм, смешивают с дистиллированной водой в отношении 10 : 6, смесь тща-тельно и быстро перемешивают и через 40 сек заливают в ци-линдр. Через 10 мин форму разбирают и блок ставят сушить (рис. 58, Б) (И. Судницын, 1959).

Применяют блоки с электродами и без них. Последние ис-пользуют для заполнения пространства на стержне между изме-рительными электродами, чтобы

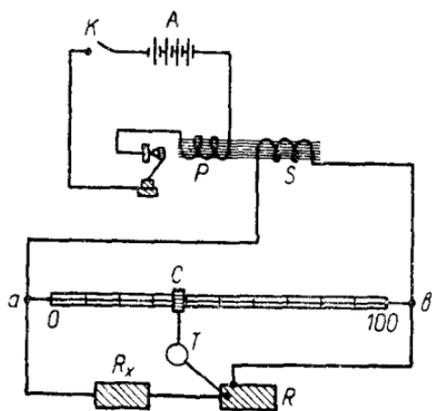


Рис. 59. Установка для определе-ния электросопротивления почвы

они не сползали. Для увеличения прочности блок пропитывают спиртовым раствором нейлоновой смолы. Такие блоки используют для стационарных наблюдений. На металлический полый стержень с прорезями для выхода проводов от электродов, опущенный в скважину в почве, нанизывают блоки так, чтобы они разместились на различных глубинах измерения. Скважину засыпают почвой, последовательно уплотняя ее. Провода от блоков идут к измерителю. В эти же блоки можно вмонтировать термопары или термометры сопротивле-

ния для определения температуры почвы. Изготавливают блоки любых размеров. Для лабораторных исследований применяют малые блоки (рис. 58 В).

А. И. Данилин (1955) применил блоки другой конструкции: угольные электроды размером  $10 \times 30$  мм закрепляют на эбонитовом стерженьке. Два электрода устанавливают на определенном расстоянии друг от друга, пространство между ними заполняют стеклянной ватой, а электроды обматывают стеклянной нитью. В таком виде блок вставляют в почву.

*Измерительное устройство и определение электросопротивления почвы  $R_x$ .* В большинстве работ для измерения электросопротивления почвы используется метод Кольрауша с применением мостика Уитстона. Падение напряжения в цепи пропорционально сопротивлению проводника, при разветвлении цепи падение напряжения между пунктами разветвления для обеих боковых цепей одинаково.

Одна цепь в мостике при измерениях составлена из манганиновой или константановой проволоки (ав), натянутой на метровую линейку (рис. 59) со скользящим на ней подвижным контактом, другая — из сопротивления реостата  $R$  и измеряемого сопротивле-ния  $R_x$ .

При соотношении

$$\frac{ac}{100-ac} = \frac{R_x}{R}$$

падение напряжения одинаково, а потенциалы в точках  $c$  и  $R$  равны, о чем можно судить по отсутствию тока при включении гальванометра или телефона между ними.

К реостату присоединяют один полюс телефона ( $r$ ) или гальванометра, другой соединяют с клеммой скользящего контакта на линейке ( $c$ ). Для измерения используют штепсельный магазин сопротивления типа Р-14 с большим общим сопротивлением  $R = 111\,110$  ом, что дает возможность измерять электросопротивление почвы при низких влажностях, когда оно резко возрастает и может достигать величины 50 000—100 000 ом.

Источником тока служит двух- или четырехвольтовый аккумулятор или батарея —  $A$ . Во избежание поляризации электродов в почве постоянный ток с помощью катушки Румкорфа ( $pk$ ) преобразуют в переменный. Провода от аккумулятора через ключ —  $K$  присоединяют к клеммам первичной обмотки ( $p$ ). С клемм вторичной обмотки ( $S$ ) индукционной катушки ток подают на концы метровой линейки  $av$ , с концов которой идут провода во вторую цепь  $R_x - R$ . Включив в реостат определенное сопротивление и замкнувши ток, передвигая по проволоке контакт, находят точку, в которой гальванометр или телефон покажет отсутствие тока. Пусть эта точка находится на расстоянии  $ac$  см от начала линейки. Тогда при длине линейки в 100 см

$$\frac{ac}{100-ac} = \frac{R_x}{R},$$

откуда

$$R_x = \frac{ac \cdot R}{100-ac}. \quad (62)$$

В настоящее время промышленность выпускает реохордный мост Р 38, работающий на постоянном и переменном токе от сети с напряжением 127 и 220 в и от внешней батареи с напряжением 2—4 в.

Отсчеты по шкале и лимбу прибора дают возможность по таблице определить отношение плеч

$$\frac{ac}{100-ac} = m.$$

Искомое сопротивление  $R_x = mR$ . В приборе имеется набор сопротивлений 1, 10, 100, 1000 и 10 000 ом. Предел измерения сопротивления изменяется мостом от 0,3 до 30 000 ом, что может оказаться недостаточным для почв с низкой влажностью (меньше влажности завядания).

Реохордный мост смонтирован в деревянном ящике с крышкой. Габарит прибора  $31 \times 25 \times 15,5$  см. Вес около 5 кг. Прибор удобен для работы как в поле, так и в лаборатории. К прибору

прилагается описание, инструкция по эксплуатации и правила пользования, помещенные на крышке прибора.

Для измерения  $R$  используют также мегометр № 1101, состоящий из измерителя и генератора постоянного тока с ручным приводом. Поляризация исключается путем перемены мест проводов, идущих от датчика к клеммам прибора.

*Ход определения сопротивления и электропроводности почвы.*  
В лаборатории перед работой с прибором определяют постоянную сосуда —  $C$ , представляющую собой отношение длины путей движения ионов к площади электродов, которая необходима для вычисления удельной электропроводности почвы. Для этого готовят 0,1 н. раствор КСl, имеющий удельную электропроводность при  $18^\circ$   $0,01119 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ . Постоянная сосуда —  $C$  равна удельной электропроводности раствора, умноженной на измеренное сопротивление его  $R_t$  в данном сосуде:  $C = 0,01119 \cdot R_t \text{ ом}^{-1}$ . При этом  $R_t$  приводят к температуре  $18^\circ$ .

Почву при данной влажности помещают в сосуд при постепенном уплотнении ее, и затем в течение 3 — 5 мин выдерживают на крышке сосуда груз для улучшения контакта почвы с электродами.

Рядом с сосудом для измерения  $R_t$  почвы в стакан с почвой или водой вставлен термометр для определения температуры в момент опыта.

Включив определенное  $R$  (магазина сопротивления), измеряют  $R_t$ . В реостате подбирают сопротивление ( $R$ ) такое, чтобы отсчет на линейке мостика, по возможности, был в центре.

Двигают ползунок по линейке до исчезновения тока в мостике, и тогда берется отсчет.

*Расчет.* Взятое сопротивление в реостате  $R = 4500 \text{ ом}$ ;

Измерение сопротивления почвы лучше проводить при одной и той же температуре или приводить его к определенной температуре, например,  $15^\circ$  по формуле 61.

Измеренное сопротивление  $R_x = 3000 \text{ ом}$ ; температура опыта  $20^\circ$ ,  $\Delta t = 20 - 15 = 5^\circ$ . Тогда

$$R_{15} = \frac{3000}{1 + \alpha \Delta t} = \frac{3000}{1 + 0,029 \cdot 5^\circ} = 2620 \text{ ом}.$$

Удельная электропроводность вычисляется на основании измеренного и приведенного к определенной температуре сопротивления  $R_{15}$ .

$$E = \frac{1 \cdot C}{R_{15}}, \quad (63)$$

где  $C$  — постоянная сосуда = 0,30,

$$E = \frac{0,30}{2620} = 11,45 \cdot 10^{-5} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}.$$

По величине  $E$  на градуировочной кривой определяется влажность. Форма рабочей записи дана в табл. 30.

Форма записи при определении электропроводности почвы

Почва	Горизонт и глубина в см	R на реостате	ac	100 - ac	R <sub>x</sub>	t° С температура в опыте	$R_{15} = \frac{R_x}{1 + \alpha \Delta t}$	$E = \frac{c}{R_{15}} \cdot 10^{-5}$ ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup>	В % влажности почвы по кривой градуир.
Чернозем	A (0—10)	4,500	40	60	3000	20	2620	11,45	17,0

Для определения влажности по электропроводности почвы строится градуировочная кривая для каждой почвы и ее генетического горизонта (рис. 60). На оси ординат наносят данные электропроводности, на оси абсцисс — % влажности.

Прочно связанная влага засоленных почв электрический ток не проводит. При употреблении дистиллированной воды градуировочная кривая дает перегиб, что связано с разбавлением почвенного раствора.

Удельную электропроводность почвы при общей или капиллярной влагоемкости необходимо давать как физическую характеристику, особую для каждой почвы и ее горизонтов (табл. 31).

Она дает представление об ионной концентрации почвенного раствора при одной и той же смоченности почв и может быть использована в практике, где необходимо знать электропроводность почвы.

*Измерение влажности в поле.* Электроды или блоки устанавливаются в почве на разных глубинах, соответствующих по возможности середине генетических горизонтов. Для этого выкапывается почвенный разрез или закладываются скважины буром, как и для установки гипсовых блоков. При установке датчиков необходимо обеспечить хороший постоянный контакт их с почвой. Датчики проводами соединяются с измерителем. Причем провода, находящиеся в почве, изоли-

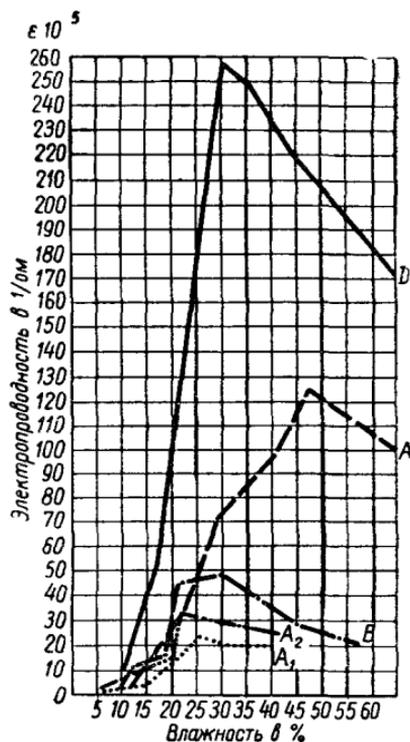


Рис. 60 Градуированная кривая зависимости электропроводности от влажности.

подзолистая почва, горизонты A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> и горизонт B Чернозем, горизонт A; D — материнская порода чернозема (с глубины 370—400 см)

Таблица 31

## Удельная электропроводность для разных почв и их горизонтов

Почва	Горизонт	$E_e \cdot 10^{-5}$ $ом^{-1}см^{-1}$
Дерново-подзолистая . .	А	21
	В	49
Чернозем . . . . .	А	124
	Д	257

руются с помощью каучуковых трубок. Для измерения  $R_x$  лучше использовать реохордный мост Р 38 или мегометр № 1101. Методика измерения описана выше.

Градуировка датчиков производится в поле при подсыхании почвы и одновременном определении влажности методом высушивания или на монолитных образцах почвы в лаборатории, что значительно быстрее. В целях проверки через 1—1,5 месяца делают контрольные определения влажности методом сушки.

Измерение влажности емкостным методом. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  неполярных минеральных веществ равна 6—9, а вода, молекула которой полярна, имеет диэлектрическую проницаемость, близкую к 81. Поэтому величина диэлектрической проницаемости в почве, в основном, определяется количеством влаги в ней. В меньшей степени она зависит от содержания солей в почве и температуры. Плотность материала диэлектрика оказывает существенное влияние на измеряемую величину, поэтому необходимо поддерживать ее постоянной.

Диэлектрическую проницаемость обычно определяют как отношение емкости конденсатора, погруженного в исследуемое вещество  $C$ , к емкости конденсатора в пустоте  $C_0$

$$\Sigma = \frac{C}{C_0}. \quad (64)$$

Емкостные датчики влагомеров — это конденсаторы, заполненные между пластинами однородным слоем исследуемого диэлектрика, в нашем случае — почвы. Для емкостных измерений применяются, в основном, мостовые и резонансные схемы. При мостовой схеме в одно из плеч включают измерительный конденсатор, в другое — эталонную емкость. В резонансной схеме используют явления резонансов в колебательном контуре, одним из элементов которого является измерительный конденсатор. Измерение диэлектрической проницаемости требует сложной дорогостоящей аппаратуры. В пищевой промышленности этот метод интенсивно разрабатывался, и в настоящее время Берлинером (1948) разработан влагомер ВЭБ, изготов-

ляемый в производстве серийно, позволяющий измерять влажность зерна и муки.

Применяли этот метод определения влажности почвы и грунтов многие: Б. П. Александров (1934, 1936, 1940), В. А. Рымша (1950, 1951), Л. Б. Пирожников и И. С. Вайшток (1955) и другие, однако и до сих пор он достаточно не разработан.

**Радиоактивный метод измерения влажности.** В настоящее время для определения влажности почв все более широко применяют методы, основанные на изменении проводимости излучения радиоактивных веществ почвой с различным содержанием влаги<sup>1</sup>.

Преимущество этих методов в том, что они позволяют сравнительно быстро провести измерение влажности почвы в полевых условиях, не нарушая ее структуры и не изменяя ее состава.

В качестве источников излучения используют радиоактивные вещества, распадающиеся с выделением нейтронов или  $\gamma$ -квантов.

Известны три основных метода определения влажности почв: 1) метод быстрых нейтронов, 2) метод медленных нейтронов и 3)  $\gamma$ -метод.

Метод медленных нейтронов и  $\gamma$ -метод уже применяются при лабораторных и полевых исследованиях почв.

Впервые *метод медленных нейтронов* был предложен Бельхером (Бевел, 1956) и его сотрудниками. Метод основан на способности воды замедлять и рассеивать быстрые нейтроны, в результате чего вокруг источника быстрых нейтронов, помещенного во влажную почву, образуются медленные нейтроны.

В качестве источника нейтронов используют Ra—Be или смесь полония и бериллия.

Гарднер и Д. Киркхэм показали, что плотность медленных нейтронов зависит только от влажности почвы: большей влажности соответствует большая плотность медленных нейтронов. Наибольшее изменение плотности медленных нейтронов происходит в радиусе приблизительно 15 см от источника: эту величину называют радиусом сферы влияния.

Показания счетчика, помещенного внутри сферы влияния, связаны с влажностью почвы почти линейной зависимостью.

Однако измерения требуют сложной аппаратуры и высокого напряжения тока. Для массовых определений метод пока не разработан.

*Гаммаскопический метод.*  $\gamma$ -лучи, проходя через почву, испытывают частичное ослабление вследствие поглощения их твердой частью почвы и водой. При постоянстве массы твердой

---

<sup>1</sup> Работающим следует знать, что радиоактивное излучение вредно для здоровья, поэтому перед работой необходимо тщательно изучить все меры защиты от излучения, изложенные в соответствующих руководствах (А. Н. Несмеянов, В. И. Баранов и др., а также в инструкциях охраны труда).

части почвы изменение интенсивности  $\gamma$ -излучения определится, в основном, влагосодержанием.

Ослабление  $\gamma$ -лучей веществом подчиняется экспоненциальному закону

$$I = I_0 e^{-ml}, \quad (65)$$

где  $I_0$  — интенсивность излучения в начальный момент в импульсах в минуту,

$I$  — то же после прохождения через вещество,

$e$  — основание натуральных логарифмов,

$m$  — линейный коэффициент ослабления лучей веществом слоем в  $l$  см (при определении влажности — водой, плотности почвы — почвой).

Вычисление коэффициента поглощения для воды —  $M_{H_2O}$ .

Логарифмируя выражения уравнения 65, получим:

$$M_{H_2O} = \frac{\ln I_0 - \ln I}{l}, \quad (66)$$

где  $I_0$  — интенсивность излучения в воздухе;

$I$  — интенсивность  $\gamma$ -излучения после прохождения слоя воды толщиной в  $l$  см.

Толщину слоя  $l$ , если определено значение  $M_{H_2O}$ , можно рассматривать как запас влаги в почве  $W$  в см. Тогда

$$I = I_0 e^{l - MW},$$

откуда

$$W_{см} = \frac{\ln I_0 - \ln I}{M_{H_2O}}$$

или, выражая запас влаги в мм,

$$W_{мм} = 10 \frac{\ln I_0 - \ln I}{M_{H_2O}}. \quad (67)$$

При другом способе расчета вначале определяют запас влаги  $W_0$  в мм в данном слое почвы (методом сушки) и измеряют соответствующее значение интенсивности излучения —  $I$ . Далее на основании измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения —  $I_t$  через установленные для определения влажности промежутки времени  $t$  определяют изменение содержания влаги —  $\Delta W$

$$\Delta W = 10 \frac{\ln I - \ln I_t}{M_{H_2O}}.$$

Общий запас влаги в почве

$$W_{общ} \text{ в мм} = W_0 + \Delta W. \quad (68)$$

Этот метод более точен и прост по сравнению с первым.

В качестве радиоактивного источника  $\gamma$ -излучения используют радиоактивный кобальт —  $^{60}_{27}\text{Co}$  с периодом полураспада 5,32 г., дающий излучение с энергией 1,33 и 1,17 мВ.

Радиоактивность почв измеряется в единицах кюри. Кюри — количество радиоактивного вещества, в котором в одну секунду распадается  $3,7 \cdot 10^{10}$  ядер, мкюри —  $3,7 \cdot 10^7$ , мккюри —  $3,7 \cdot 10^4$ .

Активность применяемых аппаратов для определения влажности изменяется в пределе 10,5 — 0,8 мкюри.

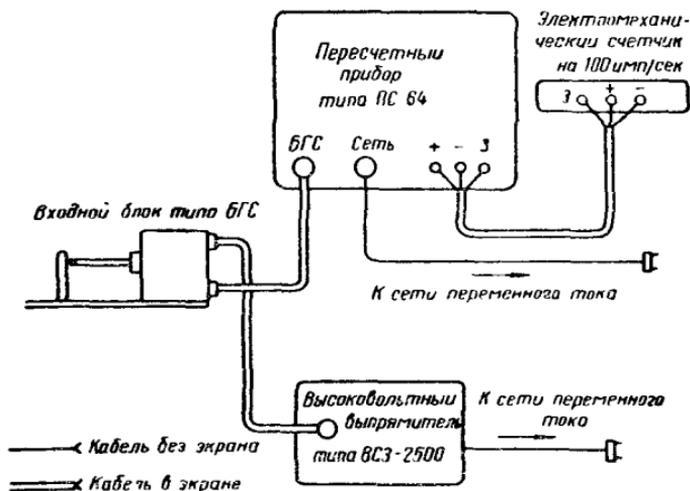


Рис. 61. Схема установки «Б»

**Счетные установки радиоактивного излучения.** В лабораториях часто применяют установку типа «Б», предназначенную для счета импульсов  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения посредством счетных трубок и пересчетного прибора типа ПС-64, приводящего в действие электромеханический счетчик. Питание счетной установки от сети осуществляют через выпрямитель на 2500 в с электронной стабилизацией типа ВСЭ-2500. Схема установки дана на рис. 61.

Подробное описание и инструкция для работы на установке «Б» прилагается к прибору, поэтому эти вопросы освещены здесь очень кратко.

Наиболее распространены счетчики Гейгера — Мюллера: цилиндрические для счета жестких излучений с энергией 0,6 мэв и торцовые для более мягкого излучения. Счетчик состоит из герметически закрытой металлической или стеклянной трубки с натянутой тонкой металлической проволокой внутри — анодом, к которому подводят положительный полюс от батареи. Катодом служит металлический корпус трубки. Если трубка стеклянная, то внутреннюю поверхность ее покрывают металлом или в качестве катода используют вставленный внутрь металлический цилиндр. Трубку заполняют гелием, аргоном или азотом с добавлением 10% многоатомных газов — этилена, ацетилен или паров этилового или метилового спирта с целью гашения электрических разрядов в счетчике.

При работе на счетную трубку подается напряжение порядка 400—1200 в с таким расчетом, чтобы не происходило пробоя газовой прослойки между нитью и катодом. Проходящие  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -кванты ионизируют газ, это приводит к разряду, возникает импульс тока, который после усиления регистрируется электромеханическим нумератором.

В зависимости от цели работы и характера излучения счетчики имеют различное устройство.

**Пересчетный прибор.** При измерениях радиоактивности частота импульсов может достигать нескольких тысяч в минуту; электромеханические нумераторы не могут регистрировать такую высокую частоту. Пересчетная установка позволяет передавать на нумератор с помощью пересчетных каскадов 1-й; 2-й; 4-й; 8-й; 16-й; 32-й или 64-й импульс.

Производя счет каждого 16-го импульса, на пересчетной установке включают соответствующий тумблер и отсчет механического счетчика в минуту умножают на коэффициент 16.

Импульсы, не переданные в момент остановки счета, пересчитывают с помощью горящих неоновых лампочек и прибавляют к импульсам, снятым со счетчика.

Проверяют правильность действия пересчетной установки. Прибор подключают в положение «проверка» и вычисляют импульсы «фона» (см. ниже) или какого-нибудь радиоактивного препарата при всех кратностях пересчетной установки: 2, 4, 16, 32 и 64. Считают в течение двух минут и вычисляют среднее значение импульсов в минуту. При проверке и в работе для точности необходимо снимать со счетчика не меньше 1000 *имп.*

Таблица 32

Формы записи при проверке пересчетной установки<sup>1</sup>

Контроль определе- ния	К р а т н о с т и					
	1	2	4	16	32	64
1			$751 \times 4 + 1 = 3005$	$187 \times 16 + 8 = 3000$		
2			$749 \times 4 + 0 = 2996$	$187 \times 16 + 13 = 3005$		
3			$752 \times 4 + 2 = 3010$	$187,5 \times 16 + 13 = 3006$		
Среднее			3004	3004		

<sup>1</sup>Пример дается для кратности 4 и 16, а проверка производится для всех кратностей счетной установки.

Расхождения между количеством импульсов при всех кратностях не должны превышать 2—3%, большие расхождения свидетельствуют о неправильной работе пересчетной установки.

Производят также определение рабочего напряжения трубки — «плато».

Разряды в трубке возникают только после некоторого предела напряжения, который называют потенциалом зажигания. По мере увеличения напряжения количество импульсов возрастает и при некоторых значениях напряжения становится постоянным, после чего резко возрастает.

При определении «плато» на трубку подают напряжение сначала 100, затем 200, 300, 400 и т. д. до 1500 в. При каждом напряжении производят отсчет импульсов и затем строится кривая для данной счетной трубки, на которой по оси ординат откладывают импульсы, по оси абсцисс — напряжение в вольтах (рис. 62).

Горизонтальная часть кривой получила название «плато». Она показывает,

при каком значении напряжения можно вести работу на данном счетчике. В нашем случае для счетной трубки СТС-6 плато располагается в интервале напряжения от 350 до 800 в. Для работы берут напряжение ближе к началу плато — 400 в. Характеристику трубки можно снимать на препарате и на фоне космического излучения, но это требует много времени, так как для отсчета при каждой кратности со счетчика надо снимать не менее 1000 имп/мин.

*Определение фона.* В атмосферу из мирового пространства проникает радиоактивное излучение, которое как фон необходимо учитывать при точных определениях. Количество импульсов фона вычитают из количества импульсов, полученных от излучаемого препарата. При определении импульсов фона на трубку подают рабочее напряжение и считают импульсы окружающего воздуха.

*Поправка на самораспад радиоактивного изотопа.* В ряде руководств дают таблицу коэффициента распада —  $K$  некоторых изотопов, при отсутствии которой величину  $K$  вычисляют с помощью уравнения:

$$K = e^{0,693 \frac{t}{T}}, \quad (69)$$

где  $e$  — основание натуральных логарифмов;

$t$  — период времени, за который определяется распад;

$T$  — период полураспада изотопа.

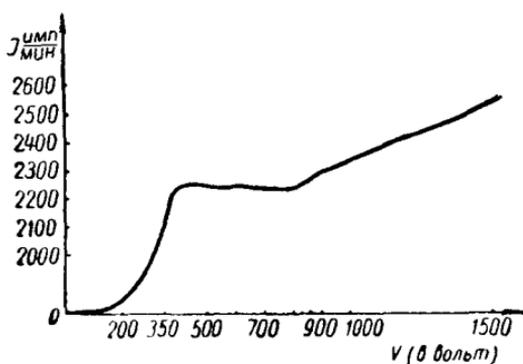


Рис. 62. Нахождение характеристической кривой для счетчика СТС-6 (кривая без нагрузки)

Пример вычисления: период полураспада изотопа  $\text{Co}^{60} = 5,32$  года, или 64 месяца. В начале опыта препарат кобальта имел активность 400 импульсов в секунду. Требуется определить его активность через время  $t=5$  месяцев

Коэффициент самораспада

$$K = e^{-0,693 \frac{t}{T}}; \ln K = 0,693 \cdot \frac{5}{64} = 0,0541$$

или, переходя к десятичным логарифмам,

$$K = 0,0541 \cdot 0,4343 = 0,02350,$$

откуда  $K = 1,056$ .

Через 5 месяцев активность препарата уменьшается в 1,056 раз и становится  $= \frac{400}{1,056} = 379$  *имп/сек.*

Формула применима для определения коэффициента самораспада любого изотопа.

На установке «Б» в зависимости от типа трубки можно производить отсчет импульсов для  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения.

Установку «Б» используют не только для определения влажности почвы, но и качественного и количественного определения солей, их передвижения в почве и растениях, при изучении фильтрации воды в почве, передвижения грунтовых вод, подъема воды в почве и др. Во всех этих случаях радиоактивные изотопы используют как индикаторы. Небольшие дозы их прибавляют к излучаемому веществу и после проведения соответствующего опыта фиксируют на счетной установке.

*Определение влажности почвы в лаборатории.* Определение влажности почвы в лаборатории путем просвечивания образца почвы  $\gamma$ -лучами. Препарат радиоактивного кобальта помещают в свинцовый контейнер для защиты работающего от облучения. через коллиматор (щель) которого на излучаемый объект подают пучок лучей.

Сначала определяют коэффициент линейного поглощения водой  $\gamma$ -излучения  $M_{\text{H}_2\text{O}}$ .

Над контейнером с радиокобальтом устанавливают цилиндрический сосуд, на котором (на высоте 10—20 см) помещают счетную трубку, соединенную с измерителем, и измеряют интенсивность  $\gamma$ -излучения  $I_0 = 173$  *имп/сек.* В цилиндр наливают воду слоем в 5 см и определяют интенсивность  $\gamma$ -излучения; после прохождения слоя воды  $I = 139$  *имп/сек.* Вычисление производят по формуле 66

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\ln I_0 - \ln I}{l} = \frac{\ln 173 - \ln 139}{5} = 0,044 \text{ см}^{-1}.$$

Повторяя определения при других мощностях слоя воды—10,15 см, из 3 определений выводят среднее значение величины.

При определении влажности почвы необходимо сохранять постоянный объем ее твердой фазы. Навеску абсолютно сухой почвы в 1—2 кг загружают в сосуд цилиндрической формы, под который подводят контейнер с изотопом так, чтобы пучок коллимированных лучей проходил через центр цилиндра. Над почвой устанавливают счетчик  $\gamma$ -квантов (схема установки на рис. 63) и измеряют интенсивность излучения  $I_0$ . Изменяя влажность взятого образца, определяют значение  $I$  при каждой степени увлажнения.

Расчет влажности в мм водного столба производят по формулам 67 и 68 или составляют предварительно градуировочную кривую, в которой по оси ординат откладывают импульсы в минуту, по абсциссе — влажность в % или мм. Тогда в последующих определениях при сохранении постоянной плотности

почвы влажность определяют по графику на основании установленного числа импульсов.

Для массовых определений в лаборатории гаммаскопический метод в настоящем техническом оформлении рекомендовать нельзя. Его можно использовать для специальных исследований.

*Определение влажности почвы в поле.* Измерения влажности гаммаскопическим методом должны найти широкое применение в стационарных условиях, где в течение всего периода измерений масса почвы между источником излучения и счетчиком остается постоянной.

Научно-исследовательский институт гидрометеорологического приборостроения (А. И. Данилин) предложил для полевых определений портативный прибор типа ИВП-64, который незначительно изменен В. А. Емельяновым в части устройства коллиматора в контейнере.

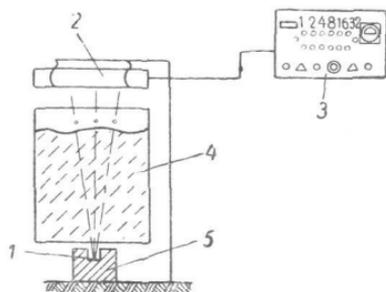


Рис. 63. Схема опыта по установлению зависимости между счетом  $\gamma$ -квантов и влажностью почвы: 1 — изотоп  $Co^{60}$ , 2 — счетчик  $\gamma$ -квантов, 3 — пересчетный прибор, 4 — сосуд с почвой, 5 — свинцовый контейнер

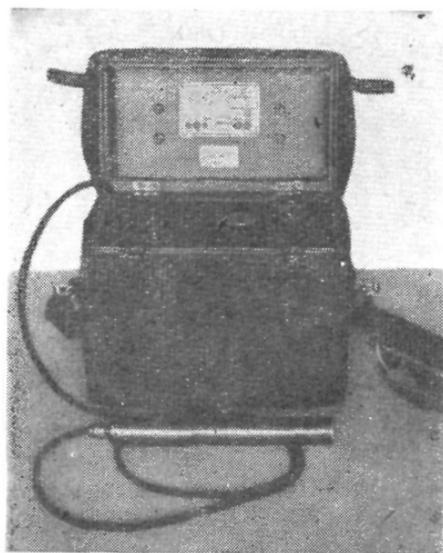


Рис. 64. Пересчетная установка типа ПС-64

приборостроения (А. И. Данилин) предложил для полевых определений портативный прибор типа ИВП-64, который незначительно изменен В. А. Емельяновым в части устройства коллиматора в контейнере.

Питание прибора осуществляется от малогабаритных батарей на 160 и 400 в. Пересчетная установка типа ПС-64 смонтирована в ящике (рис. 64).

На панели прибора расположены входной блок для подключения счетной трубки  $\gamma$ -квантов типа СТС-6 — 1, тумблер для включения напряжения (см. рис. 65), прибор, контролирующий постоянство напряжения на счетной трубке; электромеханический счетчик и система неоновых ламп для учета импульсов, не зарегистрированных нумератором, считающим каждый 64-й

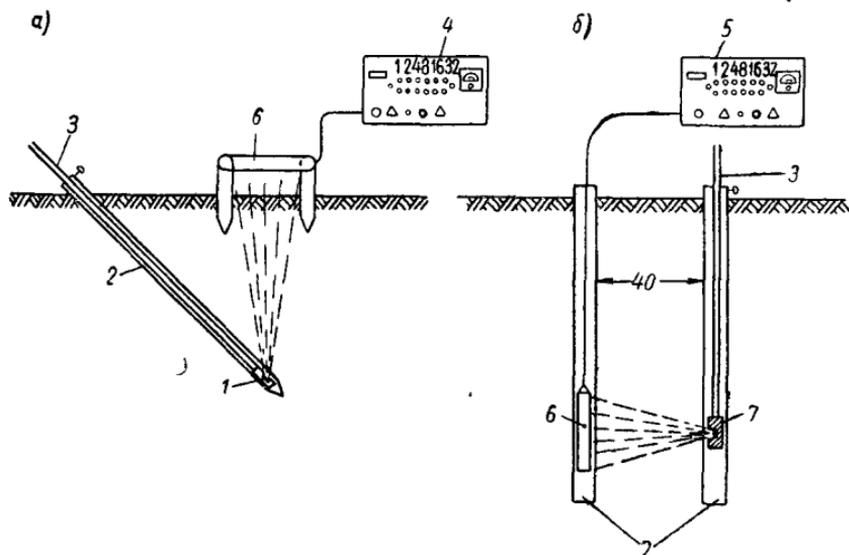


Рис. 65. Схема измерения влажности почвы в поле при помощи  $\gamma$ -лучей при вертикальном (а) и горизонтальном (б) просвечивании: 1, 7 — в контейнере изотоп  $\text{Co}^{60}$ , 2 — металлическая трубка, 3 — стержень с контейнером, 4, 5 — пересчетное устройство, 6 — счетчик  $\gamma$ -квантов

импульс. Датчик прибора — изотоп кобальта в свинцовом контейнере с узким коллиматором — прикреплен к металлическому стержню для удобства погружения в почву.

Определение влажности производят путем вертикального просвечивания (рис. 65 а). Датчик прибора — контейнер с изотопом — устанавливают в скважине так, чтобы пучок коллимированных лучей шел перпендикулярно просвечиваемому слою почвы. По одной вертикали с датчиком на поверхности почвы устанавливают счетную трубку, соединенную с пересчетной установкой. Исходную влажность в изучаемом слое определяют методом сушки и вычисляют в мм водного столба. Измеренное излучение при этой влажности соответствует  $I$ . Через установленный интервал времени определения влажности (3 — 5 и более дней) измеряют интенсивность излучения  $I_t$ . Изменение влагосодержания  $\Delta W$  вычисляют по формуле 67, а общий запас — по 68.

Изменение степени ослабления горизонтального пучка  $\gamma$ -лучей дает возможность измерить влажность в любом слое почвы. Для этого в почве на изучаемой глубине устанавливают параллельно две трубы из винилпласта или другого материала (рис. 65, б) на расстоянии 40—50 см друг от друга. В одну из них на изучаемую глубину помещают источник излучения, в другую — счетчик  $\gamma$ -лучей, присоединенный к пересчетной установке.

#### Пример вычисления влажности

Предварительно установлено, что запас влаги в слое почвы 20 см равен 60 мм. Интенсивность измеренного излучения при этом  $I_0 = 17363$  имп/мин. После дождя интенсивность  $\gamma$ -излучения уменьшилась и  $I_t = 16542$  имп/мин  $M_{H_2O} = 0,04$ . Изменение влагосодержания

$$\Delta W = 10 \frac{\ln 17363 - \ln 16542}{0,04} = 6,28 \text{ мм.}$$

Общий запас влаги  $W_{\text{общ}} = 60 + 6,28 = 66,28$  мм.

*Определение естественной радиоактивности почвы.* Радиоактивность почвы зависит от присутствия радиоактивных элементов Th, U, Ra, K<sup>40</sup>, C<sup>14</sup> и других, попавших в почву из материнской породы или атмосферы.

В зависимости от характера присутствующих радиоактивных элементов почва может давать  $\alpha$ -,  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения.

В точных исследованиях физических свойств почвы при использовании радиоактивного метода необходимо учитывать естественную радиацию почв. Определение ее необходимо также для контроля «заражения» почвы радиоактивными элементами, а также в поисковых целях в геологии.

В лаборатории суммарную величину  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения можно измерить прибором «Б», пользуясь торцовым счетчиком.

Из образца сухой почвы в 10 г берут среднюю пробу 1,5 г и помещают в алюминиевую или фарфоровую чашечку с плоским дном диаметром 2,2 см, установленную в свинцовый домик на расстоянии 5 мм от слюдяного окошечка торцового счетчика. Вследствие обычно слабой радиации почвы счет импульсов производят в течение 20—30 мин, а контрольные определения — 50—60 мин. В течение такого же времени перед каждым определением счета импульсов почвы учитывают импульсы естественного фона атмосферы. Количество импульсов почвы минус импульсы фона дают величину естественной радиации почв в импульсах в минуту.

#### КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

В зависимости от физического состояния воды и характера связи ее с почвенными частицами почвенная влага разделяется на несколько категорий (форм). По физическому состоянию выделяют в почве воду жидкую, парообразную и твердую, по

характеру связи — химически связанную, адсорбированную, капиллярную и гравитационную. Названные формы почвенной влаги обладают разными физическими и физико-химическими свойствами, подвижностью и доступностью для растений, поэтому перед описанием методики их определения даны классификация и характеристика основных форм почвенной влаги.

**Химически-связанная вода:** в ней различают конституционную и кристаллизационную воду. Конституционная вода входит гидроксильной группой в молекулу вещества, напр.,  $Al(OH)_3$ , прочно связана силами валентности. Выделяют ее нагреванием вещества до температур  $400-800^\circ C$ , когда вещество распадается.

**Кристаллизационная вода** в состав вещества входит целыми молекулами (гипса  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , мирабилит  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  и др.). С веществом она связана менее прочно, координационными силами. Удаляется при более низких температурах и не сразу, а скачками, например, при нагревании гипса одна молекула испаряется при  $107^\circ$ , вторая —  $170^\circ C$ . Вещество при этом не распадается, но изменяет свои физические свойства. В почве вода обеих названных категорий неподвижна и недоступна растениям.

**Твердая вода** — лед образуется в почве под действием отрицательных температур. Свободная вода замерзает при температуре, близкой к  $0^\circ C$ , в капиллярах температура замерзания воды падает по мере уменьшения диаметра капилляра; прочно адсорбированная вода не замерзает даже при  $-78^\circ C$ . Методику определения содержания льда в почве см. в гл. «Тепловые свойства».

**Парообразная вода** — составная часть почвенного воздуха. Количество паров в почвенном воздухе зависит от влажности почвы. По данным А. Ф. Лебедева, при влажности почвы выше максимальной гигроскопической относительная влажность воздуха почвы равна 100%. Определяют влажность воздуха при его анализе (см. гл. 4).

**Адсорбированная вода** удерживается поверхностными адсорбционными силами. Адсорбированную воду разделяют на прочно связанную и рыхло связанную. Прочно связанная вода адсорбирована почвой из окружающего воздуха. По степени увлажнения почв выделяют: гигроскопическую и максимальную гигроскопическую влажность.

**Гигроскопическая влажность** — такая влажность, которая образовалась в результате поглощения почвой влаги из воздуха ненасыщенного парами при данной температуре. Состоянию увлажнения до гигроскопической влажности соответствует термин воздушно-сухая почва. По мере увеличения паров в окружающем воздухе возрастает и величина гигроскопической влажности почвы.

**Максимальная гигроскопическая влажность.** Количество адсорбированной и конденсированной почвой парообразной влаги

из атмосферы, находящейся в состоянии, близком к насыщению (96—100%), соответствует величине максимальной гигроскопической влажности. При этом увлажнении поверхность почвенной частицы смочена полностью. Эту степень увлажнения П. Н. Колосков называет максимальной адсорбционной влагоемкостью почвы.

Прочно связанная влага недоступна растениям и величина ее соответствует недоступному «мертвому» запасу влаги в почве.

Рыхло связанная — пленочная вода. При адсорбции парообразной влаги поверхностные сорбционные силы почвы не полностью гасятся, за счет остаточных сил частицы почвы могут притягивать воду из жидкой фазы. Воду из жидкой фазы, удерживаемую молекулярными силами почвы сверх прочно связанной, называют пленочной, или рыхло связанной. Сюда же входит и часть рыхло связанной воды, образованной за счет конденсации пара. Наибольшее количество воды, удерживаемое поверхностными и молекулярными силами почвы, Лебедев назвал максимальной молекулярной влагоемкостью почвы.

Как это показано работами Б. В. Дерягина, С. В. Нерпина и других, пленочная вода передвигается от частиц, имеющих толстую водную пленку, к частицам с меньшей водной пленкой, благодаря возникающему при этом градиенту расклинивающего действия в пленках. Вместе с пленками передвигаются и растворенные соли.

По мере удаления от адсорбционной поверхности частицы свойства рыхло связанной воды приближаются к свойствам жидкой воды. Она так же труднодоступна для растений.

В состоянии пленочного увлажнения почвы выделяют влажность завядания — пределы увлажнения, при которых подвижность и доступность растениям влаги резко падает. Нижний предел влажности завядания — максимальная гигроскопическая влажность, верхний предел — несколько ниже максимальной молекулярной влагоемкости. В листьях растений при этом создается дефицит влаги, ткани теряют тургор и растения увядают.

Капиллярную воду удерживают и передвигают в почве силы вогнутых менисков, которые обусловлены поверхностным натяжением и смачиванием поверхности частиц. Различают несколько стадий капиллярного увлажнения:

капиллярно разобобщенная неподвижная влага, сюда относят: воду стыковую, накапливающуюся в углах соприкосновения частиц, и воду в отдельных замкнутых капиллярах. Ее называют по-разному: А. А. Роде и М. М. Абрамова — «водой разрыва капилляров», Ферлюи — «пендулярная влага», Колясев — влага замедленного роста.

Капиллярно подвижная влага. Отдельные стыковые участки капиллярной воды сливаются через узкие капил-

ляры в общую четочную или фуникулярную систему. Эта вода подвижна и доступна растениям.

Капиллярная легко подвижная влага заполняет все капиллярные поры размером меньше 8 мм. Это легко подвижная, хорошо доступная для растений влага. Передвигают влагу менисковые силы, определяет передвижение градиент капиллярного потенциала. Капиллярный потенциал определяют как работу, затрачиваемую на извлечение из почвы грамма воды, преодолевая силы притяжения ее почвой. Если почва увлажнена сверху осадками или при поливе, а глубже увлажнение почвы ниже капиллярного, то капиллярную воду называют «подвешенной». При увлажнении почвы снизу от зеркала грунтовых вод или верховодки капиллярную влагу называют «подпертой».

Гравитационная вода заполняет крупные поры, в которых менисковые силы не действуют. Она свободно просачивается вниз и передвигается под действием силы тяжести (гравитации), легко доступна растениям. Почти всегда присутствует в болотных почвах; при напорном состоянии грунтовых вод может находиться в капиллярной кайме. В поверхностном слое почвы бывает в период снеготаяния и после поливов.

В связи с капиллярной и гравитационной влагой различают общую капиллярную влагоемкость и водовместимость.

Общая влагоемкость почв, полевая, она же наименьшая — наибольшее количество воды, которое удерживается в состоянии равновесия после максимального увлажнения и свободного оттока гравитационной воды при насыщении почвы водой сверху и глубококом залегании грунтовых вод.

Капиллярная влагоемкость — максимальное количество воды, которое почва удерживает менисковыми силами при неглубоком залегании грунтовых вод. Величина капиллярной влагоемкости зависит от характера порозности почв и уровня грунтовых вод или зеркала свободной воды при лабораторных определениях. Она тем выше, чем ближе уровень грунтовых вод. По существу, капиллярная влагоемкость аналогична общей. Термин «капиллярная» не соответствует содержанию, так как при этом увлажнении почва содержит, помимо капиллярной, и другие формы воды.

Водовместимость, или полная влагоемкость, соответствует количеству воды, заполняющему все поры почвы. При этом влажность в объемных процентах по величине совпадает с общей скважностью почвы.

### Определение различных форм влаги в почве

**Прочно связанная влага.** Метод определения гигроскопической влажности. Гигроскопическую влажность определяют, главным образом, методом сушки образца почвы при 100°—105°С. Для определения ее из почвы предварительно

удаляют живые и негумифицированные корни. Почву размельчают в фарфоровой ступке и просеивают через сито с отверстиями в 1 мм, затем рассыпают тонким слоем на стекло или глянцевую бумагу, разделяют на квадраты, в каждом из которых (или в шахматном порядке) отбирают немного почвы в сушильный стакан. Так составляют среднюю пробу весом 5—10 г для суглинистых почв и 10—15 г — для легких. Стаканчик с почвой взвешивают и сушат при 100—105° 3 час, затем проводят контрольную сушку 1—2 час, доводя образец до постоянного веса (допустимые расхождения в весе — 0,003—0,05 г). Запись производят по форме, приведенной в табл. 28, вычисление — по формуле 51 или 53.

Знать величину гигроскопической влажности необходимо для вычисления абсолютно сухого веса. Пример: гигроскопическая влажность  $W_r = 5\%$ . Необходимо вычислить абсолютно сухой вес —  $X$  воздушно-сухой навески —  $b$ , взятой для механического анализа. Переводный коэффициент воздушно-сухой почвы в абсолютно сухую

$$K = \frac{100}{100 + W_r} (70) = \frac{100}{100 + 5} = \approx 0,95.$$

Тогда  $X = bK = 10 \cdot 0,95 = 9,5$  г.

Максимальная гигроскопическая влажность. По величине максимальной гигроскопической влажности определяют влажность завядания растений. Отношение влаги завядания к максимальной гигроскопической дает «коэффициент завядания», который колеблется в пределах 1,2—2,3. Для растений засушливых районов он меньше, чем для растений, выросших в условиях нормального или избыточного увлажнения. Кроме того, величина его зависит от вида растения: 1,3—1,6 для пшеницы, 1,7—2,3 для льна, около 2 — для чая и т. д. В среднем, в расчетах преобладает величина 1,5. Величину максимальной гигроскопической влажности определяют адсорбционным методом, по нерастворяющемуся объему и незамерзающей воде.

Адсорбционный метод определения максимальной гигроскопической влажности впервые предложил Богданов (1889). Образец почвы он помещал в замкнутое пространство над водой, выдерживал его до постоянного веса и затем методом сушки определял содержание воды. Э. А. Митчерлих предложил вести насыщение почвы парами воды в вакууме над 10%  $H_2SO_4$ . Н. А. Качинский (1930) усовершенствовал этот метод. Он предложил вместо сушильных стаканчиков диаметром 6—7 см и навески в 30 г (по Митчерлиху) использовать обычные бюксы диаметром 2—3 см и навеску почвы 10—20 г (меньшую в случае тяжелого механического состава). А. В. Николаев (1936) заменил серную кислоту насыщенным раствором  $K_2SO_4$  и предложил насыщать почву не в вакуумах, а в обычных эксикаторах, что

значительно упростило методику. Однако следует заметить, что в вакууме насыщение идет быстрее.

*Ход анализа.* Навеску в 50—100 г воздушно-сухой почвы, предварительно отобрав живые, белые на изломе корни, слегка растирают в ступке пестиком с резиновым наконечником и просеивают через сито с отверстиями в 1 мм, скелетный материал берется в навеску пропорционально его содержанию в почве.

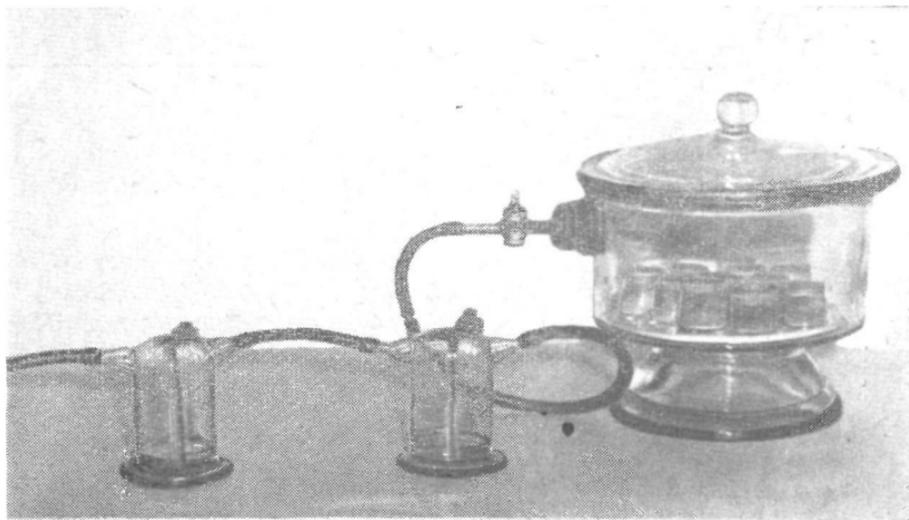


Рис. 66. Вакуумный эксикатор для определения максимальной гигроскопической влажности почвы со склянками Тищенко

Измельченный образец почвы рассыпается на лист бумаги или на стекло и из него обычным способом отбирают среднюю пробу весом 5—10 г для почв гумусных и тяжелого механического состава, 10—15 г для легких суглинков и почв, бедных гумусом, и около 20 г для песчаных почв и песков. Определение проводят с двойным контролем. Сушильные стаканы ставят в вакуумный или обычный (рис. 66) эксикатор, в который наливают — 10%  $H_2SO_4$  удельного веса 1,067 (устанавливают ареометром) из расчета 2 мл на 1 г почвы. По данным Митчерлиха, в замкнутом пространстве над 10%  $H_2SO_4$  обычно устанавливается относительная влажность воздуха в 96—98%. Вместо серной кислоты можно использовать насыщенный раствор  $K_2SO_4$  (50 г соли растворяют в 1 л дистиллированной воды), насыщенность которого устанавливают по наличию кристаллов соли в растворе. Из эксикатора с тубусом выкачивают воздух водоструйным или масляным насосом до 150—160 мм давления; эксикаторы из хорошего стекла выносят и более низкое разрежение — 5—20 мм.

При большом разрежении в целях безопасности следует надевать защитные очки, а эксикатор накрывать полотенцем. При

насыщении важно, чтобы температура была постоянной, резкие колебания температуры могут вызвать выпадение росы. Через 4—5 дней эксикатор открывают, быстро закрывают стаканчики крышками и взвешивают. В случае вакуума прежде, чем открыть эксикатор, в него вводят воздух, протягивая его через склянки Тищенко (рис. 66) с 10%  $H_2SO_4$  с такой скоростью, которая позволяет считать пузырьки воздуха. После погашения вакуума эксикатор открывают и вынимают стаканы. Как с  $H_2SO_4$ , так

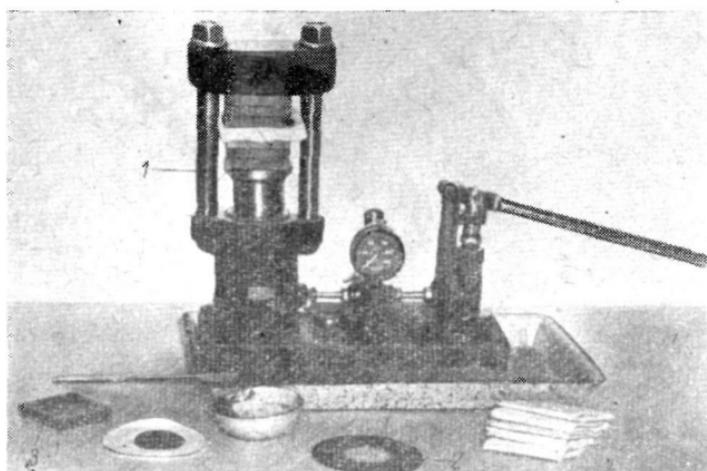


Рис. 67. Установка для определения пленочной воды:

1 — пресс, 2 — металлическое кольцо, 3 — прокладка

и с  $K_2SO_4$  насыщение почвы ведут до постоянного веса или до тех пор, пока разница между предыдущим и последующим весом будет не более 0,005 г. Для расчета используют максимальный вес. Длительность насыщения около 1 месяца. После насыщения почву сушат 3 час, повторно сушат в течение 2 час. Если разница в весе не превышает допустимую, то сушку считают законченной. Записи производят по форме, приведенной в табл. 33.

Таблица 33

Определение максимальной гигроскопической влажности  
Почва—чернозем обыкновенный

Дата работы	Горизонт и глубина образца почвы в см	№№ бюксов	Вес бюкса	Вес бюкса + почвы	Вес бюкса с почвой после насыщения			Вес бюкса с почвой после сушки	Вес воды в навеске	Вес сухой почвы	% максим. гиг. влажности	Среднее из 2 определений
					даты							
					I	II	III	г				

На основании величины максимальной гигроскопической влажности вычисляют 1) влажность завядания, принимая переводной коэффициент 1,5, 2) удельную поверхность почвы по формуле:

$$S \text{ м}^2/\text{г} = \frac{W \text{ мг}\%}{100} \cdot \frac{1}{25 \cdot 10^{-8} \cdot 10} = 4 W \text{ мг}\%, \quad (71)$$

где  $W \text{ мг}\%$  — максимальная гигроскопическая влажность в %;  
 $25 \cdot 10^{-8} \text{ см}$  — диаметр молекулы воды;  
 10 — десятимолекулярный слой воды при максимальной гигроскопической по П. Эренбергу.

Метод нерастворяющегося объема. Прочно адсорбированная вода имеет иные физические характеристики: повышенную плотность (А. В. Раковский, М. В. Чапек), пониженную теплоемкость (П. И. Андрианов), не проводит электрический ток (Вадюнина, 1937, С. И. Долгов, 1948), не растворяет соли (А. К. Трофимов). Последнее свойство использовал А. В. Думанский при разработке метода рефрактометра для определения связанной, прочно адсорбированной воды. Количество связанной воды характеризует хлебопекарные свойства муки, морозостойкость и засухоустойчивость растений. Поэтому метод А. В. Думанского используют также в хлебопекарной промышленности и в биологии. Подготовку почвы и взятие средней пробы осуществляют так же, как и при определении максимальной гигроскопической влажности.

*Ход анализа.* Навеску воздушно-сухой почвы в 30 г помещают во взвешенную плоскодонную эрленмейеровскую колбу емкостью 50 мл и взвешивают. Из бюретки в колбу приливают 20—25 мл 10% раствора сахара или глюкозы (точно концентрацию сахара определяют на рефрактометре, по показателю преломления). Определив вес колбы с почвой и прилитым раствором, по разности узнают навеску раствора сахара. Закрыв колбу каучуковой или корковой пробкой, ее взбалтывают 2—3 мин, а затем оставляют в покое в течение часа. После этого содержимое колбы взбалтывают и переносят на фильтр воронки, прикрытой часовым стеклом для предохранения от испарения. Концентрацию сахара в фильтрате определяют на рефрактометре Аббе по показателю преломления. Основная рабочая часть рефрактометра состоит из двух стеклянных призм с небольшим зазором между ними. Нижняя призма неподвижно закреплена, верхняя поднимается. Перед определением показателя преломления проверяют точность прибора, измеряя коэффициент преломления дистиллированной воды, который при 20°C равен 1,3330. Несколько капель раствора с помощью стеклянной палочки переносят на матовую грань нижней призмы рефрактометра и соединяют ее с верхней призмой так, чтобы промежуток между их гранями целиком был заполнен жидкостью. Свет от осветителя с помощью зеркала направляют в призму. Вращением ее

вокруг оси отыскивают резкую границу между освещенной и темной частью поля, которую устанавливают на крест нитей, и производят по нониусу отсчет показателя преломления —  $n$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ . Для поддержания постоянной температуры во время опыта через полые металлические оправы призм все время протекает вода с  $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ , что контролируется термометром, вставленным в специальное отверстие. Если в окуляре граница расплывчата и пестро окрашена, что обусловлено дисперсией света, то с помощью компенсатора специальным винтом снимают дисперсию и получают четкую границу.

По показателю преломления в табл. 7 приложения находят концентрацию сахарного раствора.

Для каждого фильтрата коэффициент преломления определяют три раза. Тройной контроль применяют и при установлении концентрации исходного раствора.

Вычисление связанной воды производят по формуле:

$$X\% = W\% + \frac{P(C_2 - C_1) 100}{C_2 \cdot v}, \quad (72)$$

где  $X$  — связанная вода в % от сухой почвы;

$W$  — влажность воздушно-сухой почвы;

$P$  — навеска сахарного раствора в граммах;

$C_1$  — весовая концентрация исходного раствора;

$C_2$  — концентрация сахара после взаимодействия с почвой;

$v$  — абсолютно сухая навеска почвы,  $v = \frac{30 \cdot 100}{100 + W_2}$ ,

где  $W_2$  — гигроскопическая влажность почвы.

При соприкосновении воздушно-сухой почвы с раствором сахара часть воды из раствора адсорбируется почвой, но так как эта вода не растворяет сахар, то концентрация последнего в фильтрате увеличивается.

Установлено, что величина влажности почвы, определенная методом рефрактометра, зависит от концентрации сахара: чем она выше, тем меньше величина связанной воды. Влажность, соответствующую максимальной гигроскопической влажности, получают при использовании исходной концентрации раствора сахара — 10%. Рекомендуется определить связанную воду в почве при трех концентрациях сахара — 5; 10; 15%.

Метод незамерзающей воды. При замораживании воды в почве, так же как и при горячем высушивании, упругость водяных паров остающейся влаги уменьшается до наступления момента равновесия, определяемого температурой и давлением. Можно подобрать такую температуру замораживания почвы, при которой незамерзшая влага будет иметь давление насыщенного водяного пара, соответствующее мертвому запасу влаги в почве. Метод определения мертвого запаса влаги в почве с помощью замораживания в дилатометре был предложен Боуякосом (1917),

проверен П. С. Андриановым (1940), Г. И. Покровским (1938) и др. При замораживании влажного образца почвы при  $-4^{\circ}\text{C}$  свободная вода замерзает, объем ее увеличивается. Зная коэффициент расширения воды при замерзании  $K_B = 0,1$  и приращение объема образца при замораживании почвы —  $\Delta V$ , определяют количество свободной воды в граммах

$$W_r = \frac{\Delta V}{K_B} = \frac{\Delta V}{0,1}. \quad (73)$$

Зная влажность образца почвы и количество свободной замерзшей воды, по разности определяют величину прочно связанной незамерзающей воды.

В настоящее время количество незамерзающей воды во многих лабораториях определяют с помощью калориметра. Калориметрический метод более точен, но и сложнее. Описание его дано в главе «Тепловые свойства почв».

**Рыхло связанная пленочная вода.** В этой категории почвенной влажности обычно определяют максимальную молекулярную влагоемкость и влажность завядания растений.

Определение максимальной молекулярной влагоемкости. Для ее определения Лебедевым предложены методы: высоких колонн, центрифуги и пленочного равновесия.

*Метод высоких колонн.* Стекланную трубку длиной в 1 м для песчаных почв и 3 м для суглинистых диаметром 2,5—3,5 см наполняют почвой, просеянной через сито с отверстием 1—3 мм при осторожном постукивании о край стола для лучшего уплотнения образца. Можно приготовить свинчивающиеся металлические трубки длиной 10—15 см, составляя из них колонну любой длины.

Почва в трубке увлажняется сверху количеством воды, достаточным для сквозного промачивания. После стекания избытка в верхней части колонны остается влага, удерживаемая молекулярными силами. Трубку разбирают и послойно определяют влажность. В верхней части трубки, где воду удерживали адсорбционные силы, влажность почвы наименьшая; в нижней части трубки с капиллярной влагой процент влажности резко возрастает. Из всех определений выше этого предела (исключая самый поверхностный слой) находят среднее значение влажности, которое и будет соответствовать величине рыхло связанной пленочной влаги.

Этот метод длительный, особенно при использовании его для тяжелосуглинистых почв, и недостаточно точный.

*Метод центрифуги по Лебедеву* состоит в том, что избыточно увлажненную почву помещают в силовое поле центрифуги, значительно превосходящее гравитационную силу — силу земного притяжения. Лебедев сконструировал специальную центрифугу, дающую ускорение в 70 000 раз большее ускорения силы тя-

жести, и установил, что сила в 18 000—20 000 *g* достаточна для удаления гравитационной воды и увеличение ее до 70 000 уже не сопровождается дальнейшим уменьшением влажности.

Метод пленочного равновесия (рис. 67) широко вошел в почвенную практику. Почву, просеянную через сито с отверстиями в 1 мм, увлажняют до состояния пасты. На фильтровальную бумагу или ткань, лучше без ворса (батист), накладывают металлическую пластинку, имеющую внутри круглое отверстие диаметром в 5 см. В это отверстие вмазывается до уровня толщины пластинки почвенная масса, после чего металлическую пластинку снимают, а столбик почвенной массы сверху и снизу прикрывают фильтровальной бумагой или тканью и помещают между подушками, сложенными из фильтровальной бумаги в 16—20 листов. В таком виде готовится несколько почвенных проб, которые отделены одна от другой металлической прокладкой толщиной в 5 мм или деревянной — в 10 мм. Прокладки должны быть ровные, правильной квадратной или круглой формы. Затем образцы почв прессуют под давлением 66 *кг/см<sup>2</sup>* (по Лебедеву) на масляном прессе — 1.

Чтобы отсчитать нужное давление на манометре, необходимо знать отношение между площадью поршня — *S* и площадью отверстия диска *S*<sub>1</sub>.

$$S = \pi r^2,$$

где *r* — радиус поршня,

$$S_1 = \pi r_1^2,$$

где *r*<sub>1</sub> — радиус отверстия круга в металлической пластинке;

$$\frac{S}{S_1} = 2,5.$$

Тогда расчет дает 66 : 2,5 = 26,4 *атм.*

Пробы почвы под прессом выдерживают 10 *мин.*

При полном удалении капиллярной влаги столбик почвы из-под пресса легко разламывается, при неполном — сгибается, что особенно характерно для почв глинистого механического состава. В таком случае определение следует повторить, а время прессования увеличить с 10 до 20—30 *мин.* При определении пленочной влаги необходим двойной контроль. Контрольные образцы следует помещать под пресс в разных партиях. После прессования образец почвы быстро очищают от приставших к нему волокон бумаги или ткани, высушивая, доводят до постоянного веса и определяют процент влажности. Форму записи ведут по табл. 28.

Экспериментальными работами в лаборатории физики почв МГУ и в ряде других учреждений было установлено, что с увеличением применяемого в опыте давления молекулярная влагоемкость уменьшается (Колясев, 1941, Крюков, 1947). При применении мощных прессов с давлением до 6,9 *т/см<sup>2</sup>* остаточная влаж-

ность после сжатия под прессом была даже ниже максимальной гигроскопической.

Вследствие этого определение молекулярной влагоемкости надо делать при давлении  $66 \text{ кг/см}^2$  (как рекомендовал Лебедев).

Определение влажности завядания. Помимо расчета влажности завядания по максимальной гигроскопической влажности, применяют метод обезвоживания и непосредственного определения ее путем выращивания проростков в сушильных стаканчиках (рис. 68) и доведения их до стадии завядания.

*Метод обезвоживания.* Францессон (1951) предложил метод определения влажности устойчивого завядания путем обезвожи-

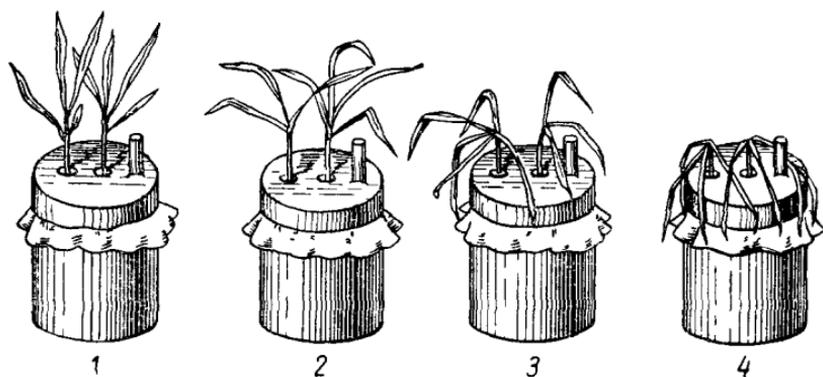


Рис. 68 Стадии завядания растений:

1 — нормально развитое растение, 2 — начало завядания, 3 — устойчивое завядание, 4 — смерть растения

вания капиллярноувлажненного образца, что, по мнению автора, больше соответствует природным условиям.

Взятые в поле образцы почвы за две недели до определения увлажняются до капиллярной влагоемкости. При высокой полевой влажности образец сразу поступает на анализ. Навеску сырой почвы в 3 г помещают в вакуумный эксикатор над 10%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . В эксикаторе создают разрежение 20—30 мм рт.ст. и через 2—3 дня производят взвешивание образца, доводят его до постоянного веса. Затем меняют концентрацию кислоты с 10% на 3% и опять периодически взвешивают почву. После установления постоянного веса образца над 3%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  почву сушат и определяют влажность в ней. Получаемая при этом величина примерно в 1,5 раза больше максимальной гигроскопической влажности, определенной увлажнением воздушно-сухой почвы над 10-процентной  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и соответствует влажности завядания, определенной вегетационным методом.

*Вегетационный метод.* В алюминиевые стаканы высотой 6—7 см при диаметре 4 см насыпают крупнозернистый песок слоем 1 см, в который вставляют стеклянную трубку длиной 8—9 см

и насыпают воздушно-сухую почву, просеянную через сито с отверстиями в 1 мм, почти до верха стакана. В стакан высевают 4—5 зерен проросшего ячменя и увлажняют почву через трубку до появления капиллярной воды на поверхности стакана. Стаканчики устанавливают в биологический термостат, где поддерживают температуру 20—25°, или в шкаф при комнатной температуре. В каждом стаканчике оставляют по 3 всхода, одинаково развитых. Стаканчики держат в освещенном помещении, но не на солнце, так как на прямом солнечном свете растения сильно вытягиваются и ломаются. Когда второй лист разовьется больше первого, почву поливают последний раз и заливают поверхность стаканчика расплавленной, но остывшей смесью из 4-х весовых частей парафина и 1 части технического вазелина. На стеклянную трубку надевают колпачок. В момент начала завядания стаканчик переносят в камеру (эксикатор с водой на дне) с атмосферой, насыщенной парами. Растения в первой стадии завядания восстанавливают за ночь тургор, в стадии устойчивого завядания — нет. Стаканчик открывают, парафиновую корку и слой почвы в 1—1.5 см сбрасывают, почву высыпают в фарфоровую чашку, нижний слой почвы и песка выбрасывают, удаляют также растения и семена и в том же сушильном стаканчике почву сушат до постоянного веса и определяют влажность в процентах, что и соответствует влажности завядания растений. Запись производят по форме, приведенной в табл. 28.

Влажность завядания вычисляется в процентах от сухой почвы и в мм водного столба (формула 50 и 52).

**Капиллярная и гравитационная влага.** Общая (Качинский) или наименьшая влагоемкость (Роде), она же предельная полевая (по Долгову и др.), — количество влаги, которое почва удерживает после увлажнения при свободном оттоке гравитационной воды. Разноименность этой важной гидрологической константы вносит много путаницы. Неудачен термин «наименьшая» влагоемкость, так как он противоречит факту максимального содержания при этом влаги в почве. Не совсем удачны и два других термина, но поскольку нет более подходящего названия, впредь мы будем использовать термин «общая влагоемкость». Название «общая» Н. А. Качинский объясняет тем, что влажность почвы при этой гидрологической константе включает в себя все основные категории почвенной влаги (кроме гравитационной). Понятие общей влагоемкости широко используют в мелиоративной практике

При установлении поливной нормы  $M$  определяют запас влаги в заданной толще почвы в  $m^3 W$  и величину общей влагоемкости  $W_{общ.}$  в том же измерении. Поливная норма

$$M m^3 = W_{общ.} - W.$$

Промывная норма засоленных почв

$$M_n = W_{общ.} - W + n W_{общ.},$$

где  $n$  — коэффициент, зависящий от засоления почвы и других ее свойств.

Разница между влажностью  $W_{\text{общ.}}$  и  $W_{\text{вл.з.}}$  (влажностью завядания) показывает диапазон продуктивной влаги почвы.

Напряжение почвенной влаги при увлажнении, соответствующем общей влагоемкости, небольшое — менее 0,1 атм или водного столба высотой 100 см.

### Определение общей влагоемкости в поле

В природных условиях общую влагоемкость определяют при неглубоком залегании грунтовой воды, когда эту величину будет определять капиллярноподпертая вода, и при глубоком залегании грунтовых вод, когда почва увлажняется за счет капиллярноподвешенной влаги.

Определяя общую влагоемкость при капиллярноподвешенной влаге, часто используют площадки после определения водопроницаемости методом заливаемых квадратов или специально увлажняют почву. Для этого площадку размером 2 × 2 м или 1 × 1 м окружают двойным кольцом валиков или рамами, сбитыми из досок.

Внешняя рама предохраняет воду от растекания из внутренней, в профиле которой будут определять влагоемкость. Площадку увлажняют из расчета промачивания почвы на глубину 50 или 100 см.

Предварительно определяют влажность почвы в поле, удельный вес скелета и твердой фазы почвы или берут средние значения этих характеристик и вычисляют, сколько воды в почве и сколько ее нужно добавить, чтобы промочить почву на заданную глубину (табл. 34).

Таблица 34

Количество воды, необходимое для полного насыщения слоя почвы 0—50 см

Глубина	Удельный вес скелета почвы	Удельный вес твердой фазы почвы	Скважность в % объема	Влажность почвы		Влажность полного насыщения слоя	
				в %	в мм	в %	в мм
0—10	1,0	2,50	60,0	10	10	60,0	60
10—20	1,0	2,50	60,0	15	15	60,0	60
20—30	1,1	2,50	56,0	20	22	51,0	56
30—40	1,2	2,55	56,0	20	24	47,0	56
10—50	1,3	2,60	50	20	26	45,0	50
0—50	—	—	—	—	97	—	282

Влажность в % от полного насыщения слоя равна скважности, деленной на удельный вес скелета почвы. Влажность в ми вычисляют по формуле 53. Следовательно, для полного насыщения слоя 0—50 см нужно 282 мм, или 2820 м<sup>3</sup>, воды.

Ввиду того, что почва уже содержит 970 м<sup>3</sup> воды, для насыщения ее до полной влагоемкости (водовместимости) нужно 2820—970 м<sup>3</sup> = 1850 м<sup>3</sup> воды на га, а на опытную площадку в 1 м<sup>2</sup> в 10 000 раз меньше, т. е. 0,185 м<sup>3</sup>. Рассчитанное количество воды увеличивают в 1,5 раза, чтобы обеспечить заданную глубину промачивания, так как часть воды будет потеряна за пределами площадки. Вычисленная норма 0,185 × 1,5 = 0,2775 м<sup>3</sup>, или 277,5 л.

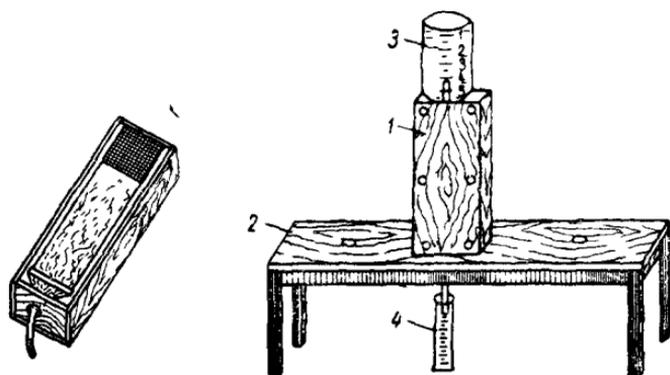


Рис. 69. Монолит, смонтированный по Астапову:  
1 — монолит, 2 — специальный стол, 3 — бутылка с водой, 4 — цилиндр для сбора фильтра

Эту норму воды подают на площадку под постоянным напором и разливают слоем толщиной в 5 см. После впитывания воды в почву площадку накрывают клеенкой, а сверху соломой, мульчей, сеном, травой для предохранения от испарения. Песчаные, супесчаные и легкосуглинистые почвы выдерживают, чтобы дать стечь гравитационным водам, сутки, суглинистые и глинистые — 2 суток. Рекомендации для выдерживания тяжелых почв от 3 до 7 суток и более мало обоснованы. Сверх этого срока влажность почвы может уменьшиться за счет миграции воды в окружающую сухую почву. Между тем растениями эта вода может быть использована (так, по данным С. Н. Рыжова (1953) хлопок в сутки потребляет 20—110 м<sup>3</sup> воды с 1 га в зависимости от стадии развития). После названного срока прикрытие снимают и определяют влажность в центральной опытной площадке с тройной повторностью до глубины промачивания.

Пробы для определения влажности берут из разреза или буром через каждые 10 см. Для этих целей удобен бур Качинского, который меньше деформирует почву и не отжимает влагу.

Пробы следует брать с учетом генетических горизонтов. Взятые в поле пробы доставляют в лабораторию, высушивают в течение 8 час и затем сушат, доводя их до постоянного веса. Запись ведут по форме, приведенной в табл. 28. Влажность, соответствующую общей влагоемкости, вычисляют в % от абсолютно сухой навески, в мм и м<sup>3</sup> в слое 0—50 и 0—100 см.

В природных условиях увлажнение почвы до общей влагоемкости наблюдается обычно после снеготаяния и поливов.

Для определения влагоемкости почвы при капиллярном насыщении от уровня грунтовых вод отбирают образцы на влажность из разреза или бурением до уровня грунтовых вод с последующим высушиванием до постоянного веса.

Содержание влаги резко возрастает начиная с верхней границы капиллярной каймы и до уровня грунтовых вод. Содержание влаги в верхней границе каймы обычно соответствует общей или предельной полевой влагоемкости. Однако для ирригационных целей необходимо производить определение влагоемкости почвы и при подаче воды сверху.

### Лабораторные методы определения общей влагоемкости

В лаборатории влагоемкость определяют в монолитах и трубках.

**Монолитный метод.** В поле берут монолит с площадью сечения 15 × 15 см при высоте от 50 до 200 см (в зависимости от цели исследования).

Взятый в поле монолит монтируют по Астапову (рис. 69). В лаборатории изготавливают монолитный ящик, высота которого на 30, а длина боковых сторон — на 5 см больше, чем у почвенного монолита. Дно и крышку его с круглым отверстием в центре снимают. В лаборатории монолитный ящик с почвой демонтируют и на почвенный монолит надевают раму лабораторного ящика так, чтобы был запас пространства между монолитом и крышками — верхней и нижней — в 15 см. К нижней части монолита прижимают латунную сетку с отверстиями диаметром 0,5 мм, к которой подводят воронку, наполненную галькой или крупным песком, и уже затем привинчивают деревянное дно с отверстием, через которое проходит конец трубки, соединяющей воронку с приемником, подставляемым к ней под столом. Зазор между стенками рамы и почвенным монолитом и другие пустоты заливают расплавленной (нагретой до 170°C) красной смолкой. Над монолитом (под крышкой рамы) устанавливают бутылку с водой и приспособлением, сделанным по принципу Мариотта и служащим для подачи воды под определенным напором.

Для наблюдения за скоростью просачивания и глубиной промачивания почвы в монолит на границах генетических горизон-

тов или на изучаемых глубинах помещают электроды — алюминиевые проволоки диаметром в 2 мм, провода от которых присоединяют к измерительному устройству, типа мостика Уитстона. В почву вставляют также изогнутые трубки — пьезометры, входные концы которых обтянуты сеткой (глубина погружения их в почву 1—2 см). Пьезометры регистрируют изменение гидродинамического давления колонны фильтрующей воды в монолите.

Монолиты 1 (рис. 69) устанавливаются на специальный стол (2) с отверстиями для приемника, предназначенного для сбора воды. Через бутылку (3) в монолит подают воду в количестве, необходимом для полного насыщения (расчет см. в табл. 33). После того как почва впитает всю воду из колодца, некоторое время в приемник еще поступает гравитационная вода из крупных пор. Объем собранной воды  $V_1$ , отнесенный к объему всей почвы  $V_2$ , дает коэффициент водоотдачи:

$$K = \frac{V_1}{V_2}. \quad (74)$$

После прекращения стока воды монолит разбирают, отбирают пробы почвы на влажность в сушильные стаканчики. Почву сушат 6—8 час и затем доводят до постоянного веса (запись ведут по табл. 27). Полученная влажность соответствует величине общей влагоемкости, которую вычисляют в % от веса сухой почвы или в мм водного столба для исследуемого слоя почвы. Для определения общей влагоемкости при капиллярном подъеме монолит ставят в ванну с водой слоем 5—6 см, наблюдают скорость водоподъемной способности почвы и после капиллярного смачивания всего почвенного монолита определяют влагоемкость. При этом показатель капиллярноподвешенной влаги обычно бывает несколько выше, чем подпертой. Естественно, что для определения общей влагоемкости можно брать и немонтированные по Астапову монолиты. Величина влагоемкости, полученная методом монолитов, выше, чем в полевом методе.

Метод трубок (для почв ненарушенного строения). В поле буром для взятия почв ненарушенного строения берут в цилиндры образцы почвы естественного сложения и рядом — образцы на влажность почвы. Цилиндр в лаборатории взвешивают на технических или техно-химических весах и ставят на фильтровальную бумагу, концы которой опущены в воду, для капиллярного насыщения. Конец насыщения в сухой почве устанавливают по потемнению капиллярноувлажненной почвы и периодическим взвешиванием цилиндра. Для предохранения от испарения сверху цилиндр закрывают крышкой или стеклом.

Пример вычисления капиллярной влагоемкости:

- 1 Вес пустого цилиндра или трубки — 100 г
- 2 Вес цилиндра + сырой почвы при насыщении:  
взвешивание I—195; II—197, III—200 и IV—200 г.

3. Вес сырой почвы в цилиндре  $200 - 100 = 100$  г.

4. Полевая влажность — 15%.

5. Вес сухой почвы в цилиндре  $= \frac{100 \cdot 100}{115} = 87$  г.

6. Вес трубки + почвы и воды после капиллярного насыщения — 222 г.

7. Вес почвенной полевой влаги в цилиндре  $= 100 - 87 = 13$  г.

8. Привес воды за счет капиллярного насыщения — 22 г.

9. Вес всей воды  $= 13 + 22 = 35$  г.

10. Влагоемкость  $= \frac{35 \cdot 100}{87} = 40,2\%$

На основании этих данных можно определить удельный вес скелета почвы и рассчитать влагоемкость в объемных процентах и в мм.

Пусть объем цилиндра  $= 75$  мл. Тогда удельный вес скелета почвы

$$d_v = \frac{87}{75} = 1,16.$$

Влагоемкость почвы в объемных процентах  $= 40,2 \cdot 1,16 = 46,6\%$ .

Влагоемкость в мм, при высоте почвенной колонны в цилиндре  $10$  см  $=$

$$= \frac{40,2 \cdot 1,16 \cdot 10 \cdot 10}{100} = 46,6 \text{ мм.}$$

**Определение влагоемкости в образцах почвы нарушенного строения.** При постановке вегетационных и лабораторных опытов необходимо знать влагоемкость почв, так как влажность почвы в сосудах задают в % от влагоемкости и в течение опыта поддерживают на определенном уровне.

*Техника определения:* из воздушно-сухой почвы удаляют крупные корни. Почву слегка разминают, просеивают через сито с диаметром отверстий в 3 мм и насыпают в стеклянную трубку диаметром 3—4 см, высотой 10—20 см, нижний конец которой обвязывают хлопчатобумажной тканью или марлей с фильтром. Величины капиллярной влагоемкости тем больше, чем ближе залегает слой почвы к зеркалу подачи воды, и, наоборот, чем дальше почва от уровня воды, тем влагоемкость меньше. Это обстоятельство следует иметь в виду при выборе длины трубки для определения влагоемкости. Почву в трубку насыпают постепенно через воронку или бумажную трубку, уплотняя ее легким постукиванием дна трубки о стол. Трубку наполняют почвой до высоты, на 1—2 см меньше высоты трубки. Все последующие операции и расчет те же, что и в методе трубки определения влагоемкости почвы, ненарушенного строения.

Количество воды, соответствующее полному заполнению всех пор почвы, называют водовместимостью или полной влагоемкостью. Такое состояние увлажнения характерно для болот при залегании грунтовых вод у поверхности, когда на водоупорном слое скопится гравитационная вода, заполняя все поры почвы над водоупором или скапливаясь в понижении водоупорного слоя.

Определить непосредственно водовместимость почвы довольно трудно. Водовместимость можно определить только с по-

мощью радиоактивных методов измерения влажности почвы *in situ*.

Монолитным методом Астапова водовместимость слоя почвы можно высчитать путем сложения количества воды при общей влагоемкости и водоотдаче. Затем вес полученной воды выражают в процентах от веса сухой почвы или от ее объема, а также в мм водного столба.

**Лабораторный метод трубок.** Образец почвы ненарушенного или нарушенного строения после определения капиллярной влагоемкости ставят в высокий стакан с водой так, чтобы уровень воды был на уровне почвы в трубке в течение всего опыта. Трубку с почвой выдерживают в воде 1 час, после чего осторожно вынимают, слегка обтирают цилиндр полотенцем и взвешивают. Снова ставят трубку в воду на 20—30 мин и взвешивают. И так повторяют до тех пор, пока не получатся близкие цифры. После насыщения расчет ведется так же, как и при определении капиллярной влагоемкости.

**Расчетный метод.** Количество воды в объемных процентах при водовместимости равно общей порозности почвы —  $P$ , которая определяется непосредственно или вычисляется по удельным весам. Если общая порозность = 50% от объема почвы, то и водовместимость в объемных процентах равна этой же величине. Водовместимость  $W_s$  % веса почвы будет равна

$$W_s \% = \frac{P}{d_v}, \quad (75)$$

где  $d_v$  — удельный вес скелета почвы.

При  $d_v = 1,25$

$$W_s = \frac{50}{1,25} = 40\%.$$

В практике полная влагоемкость, вычисленная по порозности, часто бывает меньше величины общей скважности, что указывает на наличие защемленного воздуха в почве.

Сводная таблица разных форм воды в различных измерениях дана в приложении — табл. 9.

Содержание различных форм воды определяется путем расчета: количество пленочной воды равняется разности величины максимальной молекулярной влагоемкости и максимальной гигроскопической влажности ( $W_{ммв} - W_{м.г.}$ ).

Содержание капиллярной влаги равно общей влагоемкости минус влага завядания ( $W_{общ.} - W_{зав.}$ ).

Количество гравитационной воды определяют как разность между водовместимостью и общей влагоемкостью ( $W_{в.г.} - W_{общ.}$ ).

## ГЛАВА VI

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРЕДВИЖЕНИЕ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

#### ВОДОУДЕРЖИВАЮЩАЯ ИЛИ ВСАСЫВАЮЩАЯ СИЛА ПОЧВЫ

Сухая почва энергично всасывает воду. Всасывают и удерживают воду капиллярные (менисковые), осмотические и адсорбционные силы, величина которых возрастает от первых к последним. Водоудерживающую силу почвы в литературе определяют как напряжение почвенной влаги.

Напряжение почвенной влаги, эквивалентное в своем действии капиллярному давлению, называют натяжением почвенной влаги. Напряжение почвенной влаги, удерживаемой адсорбционными и капиллярными силами, резко различно. Работу, затрачиваемую на извлечение из почвы единицы массы воды и преодолевающую водоудерживающие капиллярные силы, называют капиллярным потенциалом, а изменение величины капиллярного потенциала вдоль потока капиллярного подъема — градиентом капиллярного потенциала. Градиент потенциала определяют как производную потенциала по направлению наибольшего изменения функции.

Аналогично этому работу, затрачиваемую на извлечение из почвы единицы массы адсорбированной воды, называют адсорбционным потенциалом. Напряжение влаги при переходе от рыхло связанной к прочно связанной возрастает. Действительно, расклинивающее давление на поверхности водной пленки почвы и воздуха возрастает с уменьшением толщины пленки, как это показано в работах Б. В. Дерягина (1956). Изменение потенциала в связи с расстоянием от поверхности почвенных частиц (толщиной пленки) называют градиентом адсорбционного потенциала. Работу, затрачиваемую на преодоление адсорбцион-

ных и капиллярных сил при извлечении единицы массы воды из почвы, называют потенциалом водоудерживающей силы почвы, или потенциалом всасывающей силы.

Суммарное напряжение почвенной влаги, или водоудерживающую силу почвы, выражают высотой ртутного или водного столба, свободная энергия которого, измеряемая силой тяжести, эквивалентна водоудерживающей силе при соответствующих степенях увлажнения. Десятичный логарифм водного столба водоудерживающей силы Скофильд (1935) обозначил символом  $pF$ , что особенно удобно при высоких значениях водоудерживающей способности почв. Подобно  $pH$ , символ  $pF$  широко применяют в почвенной практике. От  $pF$  легко перейти к высоте водного столба.

Чтобы перевести значения ртутного столба по манометру, например,  $H = 10$  см в величину водного столба, умножают его на удельный вес ртути  $d = 13,5$ ,  $H = 10 \cdot 13,5 = 135$  см водного столба.

1 атмосфера давления = 76 см рт. ст. и 1026 см водного или, округляя, —  $10^3$  см водного столба. При  $pF = 7$ , высота водного столба =  $10^7$ , или 10 000 атм. Если водоудерживающая сила выражена в атм, то для перевода ее в  $pF$  умножают на  $10^3$  и далее находят логарифмы числа по логарифмической таблице.

Значение  $pF$  для различных степеней увлажнения почвы:

Капиллярной влаги . . . . .	3
Рыхло-адсорбированной . . . . .	3—4
Влажности завядания . . . . .	4,1—4,2
Воздушно-сухой почвы . . . . .	6,0
Абсолютно сухой почвы . . . . .	7,0

Всасывающую силу почвы определяют разными методами: при капиллярном увлажнении тензиометрическим, криоскопическим и омическим методами, при адсорбированной влаге — по упругости паров.

**Метод капилляриметра (тензиометрический).** Капилляриметры на английском языке называют тензиометрами — от слова *tension* — напряжение, натяжение, поэтому метод и получил название тензиометрического.

Прибор для определения напряжения влаги при капиллярном увлажнении и термин «всасывающая сила почвы» впервые предложены В. Г. Корневым.

*Капилляриметр Корнева* (рис.70) состоит из полой тонкопористой свечи с присоединенным к ней сосудом для воды, к которому присоединяют манометр. Наполнив сосуд водой, его погружают в почву. В случае почвы, ненасыщенной водой, из прибора вода отсасывается в почву, внутри прибора создается вакуум, измеряемый высотой ртутного столба. Пусть высота ртутного

столба — 74 мм, тогда высота водного столба  $\approx 1000 \text{ мм} = 100 \text{ см}$ . Всасывающая сила  $pF$  равна логарифму величины водного столба, т. е.  $pF = 2$ . При монтаже установки необходимо обеспечить абсолютную герметичность системы. Прибор можно использовать в полевых и лабораторных условиях. Принцип, лежащий в основе действия прибора Корнева, использован в ряде других капилляриметров.

*Капилляриметр конструкции ВНИИГИМ* (К. Н. Шишков, 1953) совершеннее прибора Корнева. Между ртутью манометра и водой в сосуде нет воздушной прослойки, мешающей определению. Прибор состоит из керамического фильтра, медной трубки, стеклянного сосуда для воды и манометра (рис. 71).

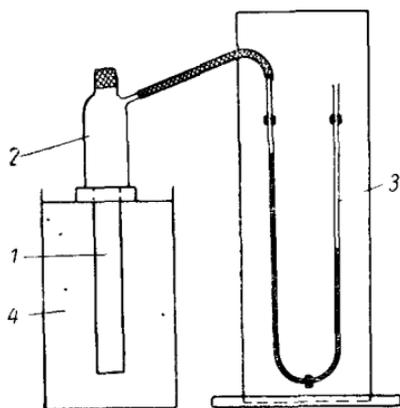


Рис. 70. Капилляриметр Корнева:  
1 — порая тонкопористая свеча, 2 — сосуд для воды, 3 — манометр, 4 — сосуд с почвой

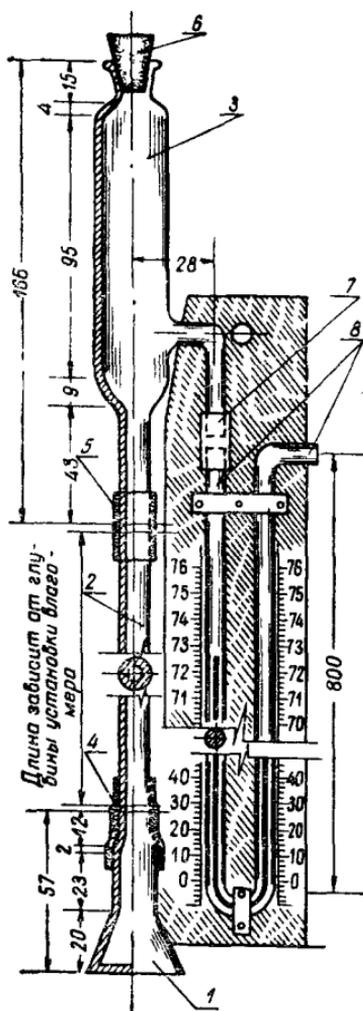


Рис. 71. Тензиометр ВНИИГИМ:

1 — керамический фильтр, 2 — медная трубка, 3 — стеклянный баллон, 4, 5, 7 — резиновые трубки, 6 — каучуковая пробка, 8 — манометр

Керамический фильтр (1) имеет форму опрокинутой воронки с дном из пористой пластинки с диаметром пор 0,9—1,3  $\mu$ . В качестве пористой пластины можно использовать бактериальный фильтр ШКЛ марки Ф-5 типа 5-а с максимальным размером пор до 1,5  $\mu$ . Остальная часть воронки покрыта глазурью. При вакууме 0,85 атм через пористую мембрану свободно проходит вода,

для воздуха при этом пластина непроницаема. Фильтр медной трубкой (2) соединен с сосудом для воды (3), верхнее отверстие которого закрывают каучуковой пробкой (6), а боковой отросток присоединяют к манометру (8). При этом используют вакуум — устойчивые резиновые трубки (4, 5, 7).

Воду в баллон заливают через верхнее отверстие, она заполняет отросток, контактируя с ртутью манометра. Фильтр устанавливают в буровую скважину почвы и плотно прижимают ко дну. Вода из прибора поступает в почву, а создающийся при этом вакуум измеряется манометром. Перед опытом устанавливают точку нуля на манометре, так как в левой части его на ртуть давит столб воды.

*Тензиометр Морозова* очень прост. Пористый полый фильтр в виде свечи диаметром 1,5—2 см и длиной 5—7 см присоединяют к резиновому вакуумному шлангу, в который вставляют тройник, соединяющий через каучук прибор с манометром и воронкой для заполнения прибора водой. Тензиометр этой конструкции можно использовать в поле и лаборатории, так как им можно работать с малым количеством почвы. Естественно, что для изучения напряжения влаги по профилю почвы необходимо устанавливать тензиометры на соответствующих глубинах. Все тензиометры измеряют напряжение только капиллярной почвенной влаги, давление которой меньше 300 мм рт. ст., а  $pF$  меньше трех. При более высоких напряжениях влаги через пористый фильтр прорывается воздух и тензиометр не работает.

Тензиометры дают возможность 1) измерить отрицательное давление капиллярной почвенной влаги (чем оно меньше, тем подвижнее и доступнее влага для растений); 2) определить потенциал по профилю капиллярносмоченной почвы —  $P_k$  (величина его пропорциональна высоте смоченного слоя почвы ( $h$ ) от уровня зеркала воды, ускорению силы тяжести ( $g$ ) и отсчитывается непосредственно по манометру ( $H$ )  $P_k = h \cdot g$ ; 3) рассчитать градиент капиллярного потенциала между двумя точками. Пример: тензиометр, установленный на глубине 100 см, показал капиллярный потенциал — 100  $\text{эрг/г}$ , на глубине 50 см, соответственно, 150. Отношение разности потенциалов к расстоянию между точками измерения (50 см) дает градиент капиллярного потенциала на единицу пути

$$P_{k/2p} = \frac{150 - 100}{50} = 1 \frac{\text{эрг/г}}{\text{см}}$$

Если показания тензиометра отградуировать на содержание влаги (Шишков), то его можно использовать как влагомер при капиллярном увлажнении почвы.

В практике орошаемого земледелия тензиометры можно применять для установления срока полива. Натяжение почвенной влаги в 30,0—50,0 см рт. ст., или 405—675 см водного столба говорит о необходимости полива почвы.

Достоинство тензиометров состоит в том, что с помощью их можно охарактеризовать энергетическое состояние влаги в поле непосредственно *in situ*.

**Определение водоудерживающей силы с помощью отсасывания воды из увлажненной почвы.** Почву помещают на воронку Нуча с тонкопористым дном. Воронку через пробку вставляют в колбу Бунзена с присоединенными к ней насосом и манометром. В колбе создают различное разрежение от 50—100 до 600 мм рт. ст., при котором систему выдерживают 3—4 час, после чего определяют остаточную влажность в образце почвы путем высушивания его и доведения до постоянного веса. Сила, с которой удерживается остаточная влажность, равна примененному вакууму в атм. Вычисления: давление по манометру = 0,5 атм, что соответствует величине водного столба  $0,5 \cdot 10^3 = 500$  см;  $pF = \lg 500 = 2,699$ ; определенная влажность образца почвы при этом разрежении равна 30% от веса сухой почвы.

Определив влажность при различных разрежениях, вычисляют значение  $pF$  для каждой степени увлажнения почвы. Метод позволяет вести определения с образцами, измельченными и просеянными через сито, а также ненарушенного строения путем взятия образцов цилиндром, размеры которого соответствуют воронке Нуча. Щель между стенкой воронки и образцом заполняют вакуумной замазкой.

Установка в этом методе определения напоминает прибор Дояренко для определения дифференциальной скважности почв (см. рис. 32), который вполне может быть использован для этой цели.

**Криоскопический метод.** Метод определения всасывающей силы основан на зависимости температуры замерзания почвенной влаги от степени связанности ее почвой. Напряжение почвенной влаги пропорционально понижению ее точки замерзания. Зависимость эта выражается формулой

$$pF = \lg H = \lg \frac{L}{T \cdot g} \Delta t = \lg \frac{L}{T \cdot g} + \lg \Delta t,$$

где  $H$  — высота столба жидкости в см, эквивалентная водоудерживающей силе,  $T$  — абсолютная температура,  $L$  — скрытая теплота замерзания воды =  $3,360 \cdot 10^9$  эрг · г<sup>-1</sup>,  $g$  — гравитационное ускорение =  $981$  эрг · г<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>,  $\Delta t$  — величина понижения точки замерзания воды в почве в градусах.

После подстановки всех значений формула принимает вид:

$$pF = 4,1 + \lg \Delta t. \quad (76)$$

Для определения почву просеивают через сито с отверстиями в 1 мм или берут образец не нарушая структуры. Температуру замерзания определяют в криоскопе (рис. 72), который состоит из сосуда (1) с охлаждающей смесью (снег + NaCl), которая дает температуру до (-)6° — (-)8°С, медного или стеклянного

стакана (3) с корковой крышкой (4) для создания наиболее равномерных условий замораживания почвы, цилиндра (6) для образца почвы ненарушенной структуры и треноги (7) для установки прибора и термометра Бекмана (5). Шарик термометра должен как можно лучше контактировать с почвой и глубже входить в нее. Для улучшения контакта в отверстие почвы для термометра наливают 0,5—1 см<sup>3</sup> ртути.

**Ход анализа:** стаканчик с почвой помещают в сосуд со снегом (температура смеси (—) 1—(—)3°C) для предварительного охлаждения. Затем ставят его в стакан (3), погруженный в охлаждательную смесь, и вставляют в почву термометр Бекмана. Система охлаждается, температура понижается. Вода в почве кристаллизуется; выделяющаяся при этом скрытая теплота замораживания компенсирует понижение температуры системы. Мениск термометра останавливается, но когда вся влага превратится в лед, температура системы начинает опять понижаться. За точку замораживания принимают момент остановки мениска термометра  $t$ . Перед опытом определяют температуру замораживания дистиллированной воды  $t_1$  для определения точки нуля термометра. Понижение точки замораживания почвенной влаги  $\Delta t = t_1 - t$ .

Иногда замораживание идет с переохлаждением ниже температуры кристаллизации, затем, после вращения термометра, в почве моментально наступает кристаллизация. На термометре отмечают скачок температуры и затем падение. За точку замораживания в таком случае принимают максимальное показание термометра.

С помощью термометра Бекмана хорошо фиксируется температура замораживания воды капиллярной и пленочной. При более низких влажностях с этим термометром работать трудно. В этих случаях температуру замораживания лучше регистрировать термопарой (сплав платины и иридия), причем отсчет производят зеркальным гальванометром. Перед опытом проводят градуирование термопары.

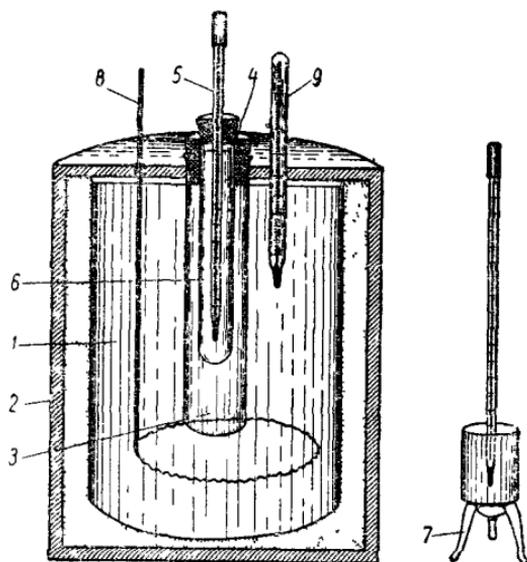


Рис. 72. Криоскоп:

- 1 — сосуд для охлаждающей смеси, 2 — термостат с войлочной прокладкой, 3 — защитный цилиндр, 4 — корковая пробка, 5 — термометр Бекмана, 6 — цилиндр для почвы, 7 — тренога, 8 — мешалка, 9 — термометр

Для определения  $pF$  почвенной влаги в лаборатории приготавливают образцы разной степени увлажнения (от общей влагоемкости до рыхло связанной и ниже в случае регистрации температуры замерзания термомпарами). Образцы ненарушенного сложения почвы, взятые в алюминиевые цилиндры с отверстием в дне, увлажняют до капиллярной влагоемкости, при которой определяют точку замерзания почвенного раствора, а затем подсушивают и определяют  $\Delta t$  при разных увлажнениях.

*Вычисление:* при влажности почвы 22%,  $\Delta t = -0,13$ , тогда  
 $pF = 4,1 + \lg 0,13 = 4,1 + 1,114 = 3,21$ .

Натяжение почвенной влаги можно определять с помощью гипсовых электроблоков. Блоки увлажняют до капиллярной влагоемкости и затем, подсушивая их, последовательно определяют электросопротивление почвы  $R$  и понижение точки замерзания  $\Delta t$  воды в блоке, путем замораживания их в холодильнике. После градуировки вычерчивают кривую изменения  $pF$  в зависимости от электросопротивления в блоке  $R$  при соответствующих влажностях. Определив в почве с помощью блоков сопротивление  $R$ , находят  $pF$  по градуировочной кривой.

С помощью блоков можно характеризовать напряжение почвенной влаги при сравнительно низких влажностях.

**Определение напряжения влаги по упругости пара.** Почва удерживает с большой силой прочно адсорбированную влагу. Для определения высоких напряжений влаги используют зависимость между влажностью почвы и упругостью паров над ней. Вычисление водоудерживающей силы производят по формуле:

$$pF = \lg H = \lg \left( -\frac{RT}{Mg} \cdot \lg \frac{h}{100} \right) = \lg \left( 2,303 \frac{RT}{Mg} \right) \cdot \left( \lg \frac{100}{h} \right) = \\ = \lg 2,303 \frac{RT}{Mg} + \lg (2 - \lg h),$$

где  $H$  — высота столба жидкости в см, эквивалентная силе напряжения почвенной влаги,

$R$  — газовая постоянная =  $8,315 \cdot 10^7$  эрг моль<sup>-1</sup> градус<sup>-1</sup>,

$T$  — абсолютная температура в С°,

$M$  — молекулярный вес пара = 18,02 г-моль<sup>-1</sup>,

$g$  — гравитационное ускорение = 981 эрг·г<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>,

$h$  — относительная влажность воздуха над почвой в %.

После подстановки перечисленных значений формула принимает вид:

$$pF = 6,5 + \lg (2 - \lg gh) \text{ при } 20^\circ\text{C}. \quad (77)$$

Для получения образцов различной степени увлажнения используют насыщенные растворы солей, над которыми в замкнутом пространстве устанавливается соответствующая относительная влажность воздуха (табл. 35).

Перед опытом почву просеивают через сито с отверстиями в 1 мм и высушивают при температуре 100—105°, доводя до постоянного веса.

## Относительная влажность воздуха над насыщенными растворами солей при 20° С

Насыщенные растворы солей	$K_2SO_4$	$Na_2CO_3$	KCl	NaCl	$NH_4NO_3$	Ca $(NO_3)_2$	$K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$
Относительная влажность воздуха в % . . . . .	98	92	86	75	65	55	45	35

Навеску абсолютно сухой почвы в 5—10 г в бюксах помещают в эксикатор с насыщенным раствором соли на дне и выдерживают в нем до постоянного веса. После этого определяют влажность путем высушивания почвы, а  $pF$  вычисляют по формуле 77.

Большое количество определений  $pF$  прочно адсорбированной влаги в разных почвах проведено С. И. Долговым (1948). В пределе насыщения почв 55—98% относительной влажности  $pF$  почвенной влаги изменяется от 5,92 до 4,50 единиц.

### СКОРОСТЬ И ВЫСОТА КАПИЛЛЯРНОГО ПОДЪЕМА

Капиллярный подъем грунтовых вод в почвенную и грунтовую толщу имеет различное значение для растений. В засушливых условиях при недостатке влаги и незасоленных грунтовых водах подъем капиллярной воды в почвенный профиль увеличивает запасы продуктивной влаги, повышает плодородие почв; с другой стороны, высокое стояние грунтовых вод может вызвать заболачивание почвы, особенно в условиях достаточного увлажнения. Засоленные грунтовые воды при интенсивном испарении влаги с поверхности почвы способствуют засолению почв.

Высота капиллярного подъема зависит от исходной влажности почв, механического состава, структуры почв, от количества и характера солей в грунтовых водах и почве, а также от температуры. Она тем больше, чем выше дисперсность почвы, ниже температура, так как поверхностное натяжение, определяющее величины менисковых сил, с повышением температуры падает. Соли-диспергаторы понижают высоту капиллярного поднятия, коагуляторы повышают. Различное содержание солей в почвенной толще может вызвать осмотическое передвижение влаги в направлении градиента концентрации.

В структурных почвах капиллярные явления выражены слабее, чем в бесструктурных. В ирригационной практике глубину залегания грунтовых вод в 6 м считают критической для почв и грунтов с высокой подъемной способностью, для почв легкого механического состава критический уровень залегания грунтовых

вод ниже. Поэтому для каждого почвенного типа и грунта необходимо непосредственно определять высоту капиллярного подъема воды —  $H$ .

### Теоретические расчеты высоты и скорости капиллярного подъема

Движение воды в узких трубках определяется разницей поверхностных давлений над плоской —  $P_0$  и вогнутой —  $P$  — водной поверхностью из формулы Лапласа:

$$P = P_0 - \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (78)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы кривизны мениска,  $\alpha$  — поверхностное натяжение воды = 74. В капиллярах цилиндрической формы  $R_1 = R_2$ , тогда

$$P = P_0 - \frac{2\alpha}{R} \text{ или } P_0 - P = \frac{2\alpha}{R}. \quad (79)$$

Радиус кривизны  $R$  мениска связан с радиусом трубки —  $r$  уравнением:  $r = R \cos \theta$ , где  $\theta$  — угол смачивания, образованный поверхностью смачиваемого твердого тела и касательной к поверхности жидкости, проведенной из точки контакта. В формуле 79 от радиуса кривизны мениска можно перейти к радиусу трубки  $r$ , тогда:

$$P_0 - P = \frac{2\alpha \cos \theta}{r}. \quad (80)$$

Под влиянием лапласовского градиента давления в направлении, противоположном ему, в почве совершается подъем воды до высоты, при которой столб воды, весом =  $Hdg$ , уравновесит разность лапласовского давления

$$\frac{2\alpha \cos \theta}{r} = Hdg,$$

где  $d$  — плотность воды = 1,  $g$  — ускорение силы тяжести = 981. Отсюда

$$H = \frac{2\alpha \cos \theta}{981 \cdot r} = \frac{2 \cdot 74 \cdot \cos \theta}{981 \cdot r} = \frac{0,15 \cos \theta}{r} \quad (81)$$

или в случае полного смачивания, когда  $\cos \theta = 1$

$$H = \frac{0,15}{r} \text{ (формула Жюрена)}. \quad (82)$$

Подсчет  $H$  по формуле 82 дает удовлетворительные результаты для песков и резко отличные значения  $H$  от фактических наблюдаемых для суглинистых почв. Это несоответствие связано с отклонением форм капилляров почвы от идеальных цилиндрических капилляров, отсутствием учета роли адсорбированных пленок воды и др. Вычисление  $H$  по формуле 81 осложняется необходимостью знать величину  $\cos \theta$ , что часто бывает труднее сделать, чем определить величину  $H$ .

Козени в песках определял высоту капиллярного подъема по формуле

$$H = 0,453 \frac{P}{1-P} \cdot \frac{1}{d_{эф}}, \quad (83)$$

где  $P$  — коэффициент порозности,  
 $d_{эф}$  — эффективный или действующий диаметр частиц и грунта, вычисляемый по формуле

$$\frac{1}{d_{эф}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right),$$

откуда

$$d_{эф} = 2 \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}, \quad (84)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  — предельные диаметры, ограничивающие взятую фракцию.

А. А. Роде в формулу Жюрена ввел поправку на порозность почвы при разных типах упаковки. При рыхлой, кубической упаковке радиус узких пор равен  $0,41 r$ , широких —  $0,73 r$ , где  $r$  — радиус частицы. Предельная высота поднятия колеблется в пределе

$$H = \frac{0,15}{0,41 r} \text{ и } H = \frac{0,15}{0,73 r}.$$

В случае гексагональной упаковки радиусы максимальных и минимальных пор соответственно равны  $0,288 r$  и  $0,155 r$ , а предельные высоты  $H = \frac{0,15}{0,155 r}$  и  $H = \frac{0,15}{0,288 r}$ .

Расчеты показали, что в случае легких песчаных почв высота капиллярного подъема изменялась от  $H = \frac{0,15}{0,73 r}$  до  $H = \frac{0,15}{0,155 r}$  и была близка к практически наблюдаемым величинам.

Скорость капиллярного подъема —  $V$  измеряют количеством воды в  $мл$ , которое проходит в единицу времени через единицу площади поперечного сечения  $V = \frac{см^3}{см^2}$ ; в линейных единицах скорость выражают в  $см/мин$  или  $см/сек$  и определяют как производную пути по времени.

Во всех грунтах, особенно в песчаных, скорость подъема с течением времени снижается, соответственно замедляется высота подъема  $H$ . Математическую зависимость высоты подъема от времени выражают формулой  $H = Kt^n$ , где  $K$  — коэффициент влагопроводности,  $n$  — постоянная, значение которой близко к  $0,5$ ,  $t$  — время. Это уравнение соответствует кривой параболического типа.

Вычисление высоты и скорости капиллярного подъема по формулам не дает удовлетворительных результатов и, кроме того, требует знания других характеристик почв, определить которые иногда бывает труднее, чем вычисляемую величину, поэтому высоту и скорость капиллярного подъема определяют чаще экспериментально.

**Определение высоты капиллярного подъема воды в поле.** Верхнюю границу капиллярного насыщения почвы за счет грунтовых вод называют капиллярной каймой. Мощностъ насыщенного слоя почвы соответствует высоте капиллярного подъема.

В поле высоту капиллярной каймы определяют по распределению влажности по профилю почвы от поверхности до уровня грунтовых вод. Повышение содержания влаги на некоторой глубине возрастает по мере приближения к зеркалу грунтовых вод. Начало резкого перегиба кривой содержания влаги соответствует высоте капиллярного подъема. Содержание влаги в этой точке соответствует величине общей влагоемкости (наименьшей).

Высоту капиллярного подъема легко определить на открытом почвенном разрезе. Почва над капиллярной каймой через 1—2 час подсыхает, светлеет; на уровне капиллярной каймы и ниже ее почва остается влажной, темной. Высоту капиллярного подъема замеряют от уровня грунтовых вод до границы смачивания.

При смоченном профиле определить высоту капиллярного подъема названными методами трудно, поэтому применяют краски-индикаторы или растворяют в почвенном растворе радиоактивные соли (меченые атомы).

Использование радиоактивных и других индикаторов при определении высоты капиллярного подъема. На влажных почвах, грунтах или торфах визуально (по влажности) границу высоты капиллярного подъема определить трудно. В таком случае используют индикаторы. В простейших случаях в качестве индикаторов на слабо затемненных почвах используют краски.

Опробование индикаторов: метиленовой сини, щелочной, сини, сафранина, нейкоцина, ализарина, фуксина, перекиси марганца, бромкрезоловой зелени и др. (Стапренс 1954) — показало, что наиболее подходяща для почв и грунтов бромкрезоловая зелень, скорость движения которой почти совпадает со скоростью движущегося водного потока. Границы смачивания выделяются при этом четко и ярко. В каждую точку наблюдения вносят 20—25 мг порошкообразного индикатора.

Применение радиоактивных индикаторов позволяет использовать растворы низкой концентрации, что в значительной мере облегчает решение задачи. Наиболее безопасна и доступна для этих целей сернистая соль натрия с радиоактивной серой  $S^{35}$  или ее кислота с периодом полураспада 87,4 дня (табл. 10, приложение); для лабораторных исследований можно применять соли радиоактивного йода J (йодистый калий или натрий). Период полураспада радиоактивного йода 8,14 дней. В собранную на дне почвенного разреза грунтовую воду вводят изотоп, например,  $S^{35}$  в виде соли  $Na_2SO_4$  активностью 10—20 мкюри.

Расчет концентрации радиоактивных солей должен быть таким, чтобы счетчик отмечал не менее 1000 *имп/мин*. Применяя

названные соли, можно использовать счетчик для  $\beta$ -излучения. В лаборатории радиоактивность проб почвы по профилю определяется на установке Б (см. рис. 61). Для полевых измерений сконструирована портативная переносная установка Б. Можно воспользоваться также прибором, данным на рис. 64. Счетную трубку прикладывают к стенке разреза и, перемещая ее вверх и вниз, находят границу повышенной радиоактивности, что соответствует высоте подъема грунтовой воды по капиллярам.

**Определение высоты и скорости капиллярного подъема в поле при отсутствии грунтовых вод.** Делают почвенный разрез до глубины, с которой хотят определять водоподъемную способность почвы. На лицевой стороне подкапывают нишу глубиной 30—25 см и шириной 35—30 см, в которую вставляют ящик из оцинкованного железа, заполненный песком. Если между монолитом почвы и песком образовалась щель, то ее забивают влажной почвой, взятой с той же глубины.

В песок заливают воду или раствор соли, при изучении влияния состава и концентрации солей на водоподъемную способность. Вода подается вручную или с помощью сосуда Мариотта. При отсутствии железного ящика можно использовать нишу, уплотняя дно и стенки ее с целью уменьшения фильтрации или используя систему противофильтрационного экрана: глина—торф—глина, глина—песок—глина, который плотно утрамбовывается в дно и стенки ниши.

Наблюдения и вычисления проводят по форме, приведенной в табл. 36. Таким способом можно определить высоту и скорость капиллярного подъема в отдельных горизонтах и их сочетаниях  $A \div B$ ;  $A_1 \div B_1 \div B_2$  и т. д.

В результате наблюдения 1) вычисляют скорость капиллярного подъема  $= \frac{H_1 \text{ см}}{T \text{ мин}}$ , где  $T$  — интервал времени в минутах или часах; 2) вычерчивают интегральную кривую высоты капиллярного подъема и его скорости. Если определяют влажность в промоченной толще, то дают кривую распределения влаги в зависимости от высоты капиллярного поднятия.

**Изучение высоты капиллярного подъема на монолитах.** В зависимости от задачи используют монолиты разной высоты: 20, 100, 200 см и более. На лицевую сторону монолитного ящика накладывают стекло. Монолиты ставят в ванну с водой, уровень которой поддерживают с помощью сосудов Мариотта.

Наблюдения ведут по схеме, приведенной в табл. 36. При неравномерном подъеме вычисляют среднее значение  $H$  из 2—3 отсчетов.

Можно использовать монолиты, смонтированные по Астапову, где, кроме визуального наблюдения за подъемом воды, высоту поднятия можно определить с помощью электродов. На уровне капиллярного смачивания электросопротивление резко падает.

Расчеты высоты и скорости капиллярного подъема воды в почве

Почва и глубина подачи воды	Дата	Часы наблюдений	Интервалы наблюдений	Отсчеты высоты поднятия воды в см $H$		Высота поднятия воды за данный интервал времени $H_1$ в см		$H_1$ — среднее из 2 отсчетов	Скорость поднятия в см/мин	в см/час
				I	II	I	II			
Каштановая желосуглинистая Глубина подачи воды — 50 см	I. VI	10 ч. 10'	0	0	9,5					
		10 ч. 15'	5'	7,2	9,5					
		10 ч. 20'	5'	9,2	11,3	2	1,8	1,9	0,38	22,80
		10 ч. 25'	5'	11,1	12,9	1,9	1,6	1,7	0,34	20,40
		10 ч. 30'	5'	12,3	14,1	1,2	1,2	1,2	0,24	14,20
		10 ч. 35'	5'	13,3	14,8	1,0	0,7	0,9	0,18	10,80
		10 ч. 40'	5'	14,2	15,6	0,9	0,8	0,85	0,17	10,20
		10 ч. 50'	10'	16,2	16,8	2,0	1,2	1,6	0,16	9,60
		11 ч. 00'	10'	17,6	18,3	1,4	1,5	1,4	0,14	8,40
		11 ч. 10'	10'	18,5	19,2	0,9	0,9	0,9	0,09	5,40
		11 ч. 40'	30'	22,0	22,0	3,5	2,8	3,1	0,103	6,18
		12 ч. 10'	30'	25,1	25,1	3,1	3,1	3,1	0,10	6,0
		12 ч. 40'	30'	27,1	27,1	2,0	2,0	2,0	0,066	3,96
		13 ч. 10'	30'	28,9	28,6	1,8	1,5	1,6	0,053	3,18

Метод трубок. В лаборатории закономерности высоты капиллярного подъема в зависимости от механического состава, структуры и содержания солей можно проследить в стеклянных трубках.

Дно стеклянной трубки диаметром 3—4 см, высотой 1 м (или составленной из трубочек по 10 см путем склеивания бумагой) обвязывают марлей с фильтровальной бумагой. На всю длину трубки приклеивают полоску миллиметровой бумаги, по которой ведут отсчет высоты подъема воды.

Для определения влияния механического состава на высоту капиллярного подъема используют песок, супесь, легкий, средний и тяжелый суглинки. Почву просеивают через сито с отверстиями в 1 мм<sup>2</sup>, насыпают в трубку при легком постукивании дном трубки о край стола (для равномерного уплотнения). Трубку заполняют почвой так, чтобы сверху оставалось около 1 см не заполненным почвой и устанавливают в ванну с дистиллированной водой. Далее наблюдения над водоподъемной способностью ведут по форме, приведенной в табл. 36.

Для определения влияния структуры почвы на высоту капиллярного подъема из воздушно-сухой почвы с помощью сит

выделяют структурные фракции размером  $<0,25$ ,  $0,25-1$ ;  $1-3$ ;  $3-5$  мм. Контролем служит почва, просеянная через сито с диаметром отверстий 5 мм<sup>2</sup>, содержащая смесь всех изучаемых фракций. Затем производят то же самое, что и при изучении влияния механического состава.

Для определения влияния солей на капиллярный подъем готовят растворы солей, диспергирующих почву (NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) и коагулирующих высокодисперсные частицы (CaCl<sub>2</sub>, NaCl). Концентрация используемых солей примерно должна соответствовать концентрации солей грунтовых вод или почвенного раствора.

Для демонстративного опыта готовят 0,01 н. растворы солей. Контролем служит вода. Почва во всех трубках одна и та же, просеянная через сито с отверстиями в 3 мм<sup>2</sup>, загружают ее в трубку так же, как и в предыдущих опытах.

При изучении зависимости скорости и высоты капиллярного подъема от температуры трубки с почвой и водой помещают в термостаты с разной температурой: 10°, 20° и 30°. Особенно хорошо держат постоянную температуру политермостаты. Наблюдения, расчеты и графическое оформление производят по форме табл. 36. Если трубка сплошная и необходимо изучить распределение капиллярной влаги, ее распиливают напильником на десятисантиметровые отрезки, из которых берут пробы для определения влажности. В сборной метровой трубке влажность определяют в каждом слое в 10 см.

Метод капилляриметра. Для измерения высоты капиллярного подъема в поле может быть использован любой из нижеописанных капилляриметров — Корнева, ВНИИГИМ или Морозова.

Водоудерживающая сила, измеренная ими, выраженная высотой водного столба в см, соответствует высоте капиллярного подъема в данной точке почвы или грунта.

В лаборатории для сравнительной оценки водоподъемной способности различных почв и грунтов при разных условиях можно рекомендовать простой капилляриметр типа Гунара — Бескова (рис. 73), состоящий из цилиндра для почвы 1, высотой 20 см и диаметром 6—8 см. Дно цилиндра — 2 изготовляют из мелкой металлической сетки или пористой пластины. Цилиндр заполняют почвой нарушенного или естественного сложения. При помощи каучуковой или корковой пробки — 4 цилиндр с почвой вставляют в сосуд — 5 для воды и ртути. В отверстие пробки вставляют отводную трубку для воздуха — 6, закрываемую пробкой — 7 или каучуковой трубкой с зажимом. Сосуд — 5 толстой каучуковой трубкой — 10 через тройник — 9 соединяют с делительной воронкой со ртутью — 11 и измерительной манометрической трубкой — 12, подвижно прикрепленных на штативах.

*Ход работы.* Цилиндр заполняют почвой. Если исследуют образец ненарушенной структуры, зазор между стенкой сосуда

и почвой заливают расплавленным парафином. Цилиндр с почвой ставят на влажный песок для капиллярного увлажнения. Затем цилиндр — 1 вставляют в сосуд — 5, заполненный снизу ртутью, а сверху водой. Открывают трубку — 6 и, поднимая сосуд — 11, заливают почву водой настолько, чтобы на поверхности ее обра-

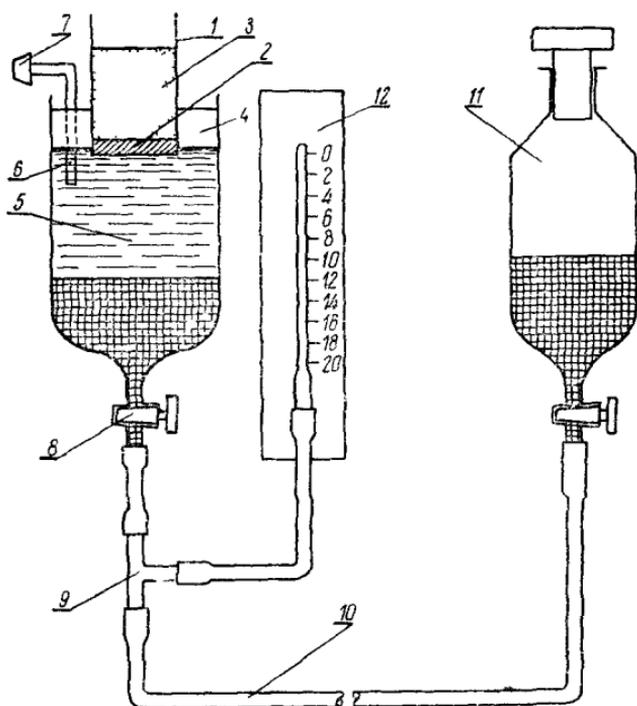


Рис. 73. Капилляриметр Гунара—Бескова:

- 1 — цилиндр для почвы, 2 — дно цилиндра, 3 — почва, 4 — пробка, 5 — сосуд для воды и ртути, 6 — трубка для отвода воздуха, 7 — пробка, 8 — кран, 9 — тройник, 10 — каучуковая трубка, 11 — делительная воронка со ртутью, 12 — манометр

зовался слой воды толщиной в 1 мм. После этого закрывают трубку — 6, манометрическую трубку — 12, градуированную по длине на см, устанавливают так, чтобы ее нулевое деление совпало с нижним уровнем почвы в цилиндре. Затем постепенно, следуя за уровнем ртути в манометре, опускают сосуд 11, придерживая его на 1—2 мин после каждого опускания на 1—2 см для установления равновесия. При некотором положении происходит отрыв столба воды в сосуде — 5 от почвенной колонки. Отсчет в этот момент по манометру дает возможность вычислить высоту капиллярного подъема воды в см водного столба  $H_k$ .

Расчет: перед опытом ртуть в манометре стояла на 0; в момент отрыва на 10 см,  $H_k = 10 \cdot 13,6 = 136$  см водного столба.

Если дном цилиндра служит пористая пластинка, то вводят

поправку на ее капиллярные силы, которую определяют так же, но без загрузки сосуда почвой.

Пары ртути ядовиты, поэтому резервуары со ртутью должны быть закрыты.

### Влияние градиентов влажности, температуры и концентрации солей на передвижение капиллярной воды

Влияние градиента влажности на движение воды в капиллярах изучали многие исследователи (С. И. Долгов, А. В. Лыков, В. Я. Стапренс, Б. В. Дерягин и М. К. Мельникова). Установлено, что скорость потока воды в капиллярнопористом теле почвы возрастает с увеличением влажности. Поток воды в почве по аналогии с потоком тепла или электричества подчиняется закону

$$Q = -K_g \frac{dH}{dl}, \quad (85)$$

где знак минус показывает, что передвижение влаги идет в направлении, противоположном градиенту;  $Q$  — количество воды, проходящее в единицу времени через единицу поперечного сечения почвенной колонны (плотность потока воды);  $K_g$  — коэффициент влагопроводности (количество воды в  $g$ , переносимое в единицу времени через площадь сечения в  $1 \text{ см}^2$ );  $H$  — капиллярный потенциал;  $l$  — длина почвенной колонки;  $\frac{dH}{dl}$  — градиент капиллярного потенциала.

$K_g$  определяют различными методами, наиболее распространен из них метод стационарного потока. Почву помещают в цилиндрический сосуд или монтируют монолит по Астапову. Нижний конец почвенной колонны увлажняют водой, находящейся в мерном сосуде, с противоположного конца вода испаряется; через определенные промежутки времени расход воды из сосуда регистрируют, по нему определяют величину  $Q$ . После установления постоянного расхода воды за счет испарения в почвенной колонне измеряют капиллярный потенциал  $H$  (тензиометром) и влажность  $W\%$ , что дает возможность рассчитать величину  $\frac{dH}{dl}$ . По найденным величинам вычисляют  $K_g$ .

В. Я. Стапренс (1954) провел многочисленные определения коэффициента влагопроводности песчаных почв методом трубок, наполняя их различно увлажненной почвой и наблюдая за высотой капиллярного подъема  $H$  через определенные промежутки времени.

Было установлено, что коэффициент водопроницаемости  $K_g$  при 25% влажности почвы равнялся  $8,1 \cdot 10^{-3}$ , а при 12% —  $4,9 \cdot 10^{-4} \text{ см/сек}$ .

Высота капиллярного подъема через шесть часов во влажной почве была 46, в сухой — 5 см.

Влияние температурного градиента на передвижение капиллярной воды. Изменение температуры влияет на вязкость движущейся воды, поэтому в расчетных формулах коэффициента фильтрации и водопроводимости данные приводят к температуре  $10^{\circ}$  (с помощью формулы Хазена).

Наличие температурного градиента в почве, по данным Б. В. Дерягина и М. К. Мельниковой (1956), вызывает перемещение воды за счет термоосмоса, обусловленного различным удельным содержанием тепла на границе воды с твердым телом и в объеме воды, что приводит к осмотическому передвижению в сторону высокой температуры и может иметь существенное значение в водонасыщенных почвах при высоких температурных градиентах. Температурный градиент вызывает градиент поверхностного натяжения воды, так как при понижении температуры поверхностное натяжение увеличивается и термокапиллярный ток движущейся воды направляется в сторону более низких температур.

Таким образом, температурный градиент при преобладании термоосмоса может вызвать ток воды в сторону более высоких температур, термокапиллярный же ток направлен в сторону более низких температур.

Для определения количества воды, переносимого термокапиллярным током, свинчивают металлическую трубку диаметром 3—5 см, длиной 25—50 см из трубок длиной в 5 см. Трубку наполняют увлажненной почвой, просеянной через сито с отверстиями в 3 мм<sup>2</sup>. В концы трубки входят массивные латунные стержни, закрывающие отверстия и плотно прилегающие к почве. Трубка укладывается в горизонтальном положении.

На концах трубки создают температурный градиент путем нагревания одного конца латунного стержня, второй конец которого опускали в охлаждающую смесь.

В середину конечного пятисантиметрового слоя с обеих сторон впаяны термпары, позволяющие мерить градиент температуры между концами трубки, который в течение опыта поддерживается на постоянном уровне, например,  $2^{\circ}$  на 1 см. Опыт проводят 6—12 час, после чего трубку разбирают и в каждом слое толщиной в 5 см определяют влажность. Влажность рассчитывают в процентах или в г/см<sup>2</sup>/час, для чего приток к холодному концу колонки делят на площадь ее поперечного сечения и на время в часах.

Градиент осмотического давления вызывает перемещение капиллярного тока воды в сторону повышенных концентраций. Для засоленных почв капиллярный осмос имеет большое значение, однако мало изучен, и методика определения осмотического перемещения воды в почвах и грунтах еще недостаточно разработана. Предложенные Б. В. Дерягиным (1947), Г. Ф. Рельтовым и Н. А. Новицкой (1954) методы дают возможность изучать

капиллярный осмос на моделях, условия которых очень мало сходны с естественными.

Передвижение пленочной влаги под влиянием градиента расклинивающего давления. Пленочный механизм передвижения воды впервые был установлен и экспериментально обоснован Лебедевым. В дальнейшем теория пленочного передвижения разработана Дерягиным, Мельниковой и Нерпиным. В пленках, имеющих неодинаковую толщину, возникает градиент расклинивающего давления, причем его наблюдают только в пленках толщиной меньше  $10^{-5}$  см.

Скорость передвижения пленочной воды в лабораториях наблюдают в трубках, составленных из коротких отрезков в 5—10 см. Различную влажность задают в пределе максимальной гигроскопической и молекулярной влагоемкости. Методика измерения скорости передвижения пленочной воды не разработана.

Передвижение парообразной влаги в почве. Диффузионное передвижение парообразной влаги в почве осуществляется в основном под влиянием градиента упругости паров и подчиняется закону Фика.

В почве упругость паров увеличивается с увеличением влагосодержания от нуля до максимальной гигроскопической влажности. При более высоких влажностях, по данным Лебедева, относительная влажность почвенного воздуха равна 100% или близка к этой величине. Упругость паров возрастает с увеличением температуры почвы. При неоднократной температуре в толще почвы температурный градиент создает градиент упругости паров, что обуславливает явление термодиффузии. Процессы внутрипочвенного потока парообразной влаги, а также выхода в атмосферу и поступление паров атмосферы в почву рассматривают с точки зрения влияния их на влажность почвы. По Лебедеву, почва закрепляет парообразную воду молекулярной сорбцией и термической конденсацией. Молекулярной сорбцией называют процесс поглощения паров воды поверхностными силами почвенных частиц; термическая конденсация — укрупнение частиц паров воды при понижении температуры, выпадение их в виде росы с последующим поглощением почвой.

В работе А. А. Роде (1952) показано, что при относительной упругости пара до  $0,40 = \frac{P}{P_0}$ , где  $P$  — равновесная упругость пара,  $P_0$  — абсолютная упругость водяного пара, насыщающего пространство при данной температуре, сорбция подчиняется уравнению Кулона — Фрейндлиха:

$$a = \alpha \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{n}, \quad (86)$$

где  $a$  — количество паров воды, адсорбированное на единицу массы

сухой почвы;  $\frac{1}{n}$  — постоянная, на графике характеризует величину наклона прямой,  $\alpha$  — постоянная, зависящая от дисперсности почвы.

При относительной упругости от 0,40 до 0,80 (или относительной влажности воздуха 40—80%) сорбция паров почвой подчиняется уравнению Сперанского:

$$a = a_0 + K \left( \frac{P}{P_0} \right)^2, \quad (87)$$

где  $a_0$  и  $K$  — постоянные, остальные обозначения те же, что и в предыдущей формуле.

В лаборатории передвижение парообразной влаги и ее сорбцию Лебедев изучал в пробирках или трубках. Нужно брать образцы различно увлажненной почвы, но не выше максимальной гигроскопической. В пределах этого увлажнения более влажную почву помещают в пробирку или трубку, закрытую внизу пробкой. Поверх слоя почвы толщиной 5 см кладут в 2—3 слоя парафинированную сетку, через которую свободно проходят пары. Сетку засыпают слоем более сухой почвы (5 см). Пробирку закрывают корковой пробкой и заливают парафином. Пробку прокалывают иглой для выравнивания давлений. Смонтированные пробирки ставят в термостат с постоянной температурой и через 10 дней определяют влажность в нижнем и верхнем слое почвы. Увеличение влажности в верхнем слое обусловлено диффузионным перемещением паров воды из нижележащего слоя и поглощением их почвой на изучаемой глубине.

Передвижение паров под влиянием термического градиента можно проследить в трубке длиной 10—20 см при разных влажностях почвы. Один конец трубки охлаждают, другой нагревают, при этом между прослойками в 5—10 см необходимы парафинированные сетки, чтобы исключить перемещение жидкой воды вдоль колонн.

Колясев (1953) производил наблюдения над перемещением парообразной влаги на монолитах. В монолит вмонтировали электроды для измерения влажности почвы и термодары для измерения температуры; приспособление для обогрева почвы снизу и охлаждения сверху давало возможность вести наблюдения при заданном градиенте температуры.

В полевых условиях делают разрез с нишами в стенках на определенных глубинах. В ниши ставят открытые стаканчики с почвой, разрез закрывают периодически, его открывают и стаканчики взвешивают. Привес относят за счет конденсационной или адсорбированной влаги. В лаборатории физики почв МГУ конденсацию парообразной влаги изучали в буровых скважинах, в которые вставлялась металлическая трубка из дюралюминия, с большим количеством окон для свободного прохождения воздуха. Внутри трубы были выступы, на которые устанавливали алюминиевые стаканчики с почвой, диаметр которых 3—4 см,

дно — с мелкими отверстиями для свободного прохождения воздуха. На уровне земли трубку закрывали землей. Периодически (через 10—15 дней) проводили взвешивание бюксов и, таким образом, в течение круглого года можно было проследить передвижение парообразной влаги и динамику влажности почвы.

Необходимо помнить, что полевые и лабораторные определения передвижения пара в почве следует сопровождать измерениями температуры в точках наблюдения.

---

## ГЛАВА VII

### ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОЧВ И ГРУНТОВ

Под водопроницаемостью почв и грунтов понимают способность их впитывать и пропускать через себя воду, поступающую с поверхности. Процесс этот складывается из 1) поглощения воды почвой, 2) прохождения ее от слоя к слою в ненасыщенной почве и 3) фильтрации воды сквозь толщу почвы. Впитывание воды почвой, еще не насыщенной до состояния влагоемкости, в первой и второй фазах происходит под влиянием сорбционных и менисковых сил, а также градиента напора. Под фильтрацией понимают прохождение воды сквозь водонасыщенные слои почвы, под влиянием градиента напора. Впитывание выражают коэффициентом впитывания, фильтрацию почв — коэффициентом фильтрации.

В природных условиях разделить процесс водопроницаемости на отдельные фазы почти невозможно; когда поверхностные горизонты, получившие воду в первую очередь, уже насытились и начинают ее фильтровать, нижележащие горизонты начинают только впитывать воду. Фильтрацию в чистом виде в природе можно наблюдать в дне водоемов, рек, каналов, а также в случаях подачи воды на почву в больших количествах, когда промачивают все слои почвы до грунтовой воды.

В агрономической практике чаще имеют дело с процессом впитывания, так как воду подают в небольшом количестве.

Раздельное изучение процессов впитывания и фильтрации в полевых условиях можно проводить лизиметрическим методом, в лаборатории — на монолитах и образцах нарушенного сложения. Концом впитывания и началом фильтрации считают момент появления первой капли фильтрата в нижней части фильтрующей колонны.

Различные свойства отдельных горизонтов сильно изменяют

водопроницаемость почвы. Величина и характер ее в сильной степени зависят от порозности почвы и грунта — от величины и формы пор, что, в свою очередь, связано с механическим составом и структурой. В почвах и грунтах легкого механического состава, песчаных и супесчаных, а также бесструктурных — она зависит лишь от сложения механических элементов; в почвах структурных водопроницаемость обусловлена размером агрегатов, их положением друг относительно друга и, главным образом, их водопрочностью.

Водопроницаемость зависит от влажности почвы, содержания обменного Na — сильного диспергатора. Существенное значение имеет наличие в почве трещин, крупных червоточин и ходов землероев, что вызывает водопроницаемость провального характера.

Наличие в почве капиллярных и некапиллярных пор обуславливает неоднородное движение воды ламинарного и турбулентного характера. При ламинарном движении вода проходит через почву равномерно, промачивая ее на одинаковую глубину. Ламинарное передвижение воды характерно для почв и грунтов гомогенного сложения.

Турбулентная водопроницаемость объясняется неоднородным сложением почв и грунтов, наличием некапиллярных промежутков: трещин, ходов землероев и т. п. При турбулентной водопроницаемости промачивание почвы происходит неоднородно, на разную глубину, поливная вода в таких случаях расходуется нерационально.

Передвижение воды в почвах и грунтах сверху вниз обусловлено разностью напоров, поэтому вода увеличивает скорость движения с увеличением разности напоров и уменьшением длины фильтрационного пути, так как с последним связано сопротивление, испытываемое водой при движении. Зависимость скорости фильтрации от величины напора была выявлена Дарси в 1856 г., он же выразил ее математически формулой, получившей название «закона» Дарси.

Дарси установил, что расход воды на фильтрацию в единицу времени прямо пропорционален разности напоров на определяемой длине колонны и площади поперечного сечения потока и обратно пропорционален длине пути фильтрации:

$$Q = KS \frac{H}{L},$$

где  $Q$  — расход воды в единицу времени;

$K$  — коэффициент фильтрации;

$S$  — площадь поперечного сечения потока;

$H$  — разность гидростатических напоров верхнего и нижнего концов колонны — потеря напора;

$L$  — длина пути фильтрации.

Отношение потери напора  $H$  к длине пути фильтрации  $L$  носит название гидравлического градиента или пьезометрического уклона и выражается буквой  $I$ .

$$I = \frac{H}{L},$$

что показывает падение напора на единицу пути фильтрующего слоя. С этой величиной формула принимает вид:

$$Q = K \cdot S \cdot I. \quad (88)$$

Из формулы (88) выводят коэффициент фильтрации или расход воды на единицу площади в единицу времени на единицу уклона при данной температуре:

$$K = \frac{Q}{S \cdot T \cdot I}. \quad (89)$$

При градиенте напора, равном единице, коэффициент фильтрации имеет размерность скорости фильтрации.

Формула Дарси выведена на основании лабораторных исследований фильтрации воды в трубках с однородным песком, поэтому приложима к условиям ламинарного движения воды в однородных песках при диаметре частиц от 0,5 до 2 мм, а также к условиям установившейся фильтрации (дно водоемов, каналов и т. п.). Однако и в почвенной практике ее широко применяют для вычисления коэффициентов впитывания и фильтрации.

Водопроницаемость почв в сильной степени зависит от температуры воды, так как с ее изменением изменяется вязкость воды, с чем связана и подвижность. Принято водопроницаемость приводить к одной температуре, а в величину коэффициента фильтрации вносят поправку на температуру, приводя ее к 10°C по формуле Хазена:

$$K_{10} = \frac{Kt}{0,7 + 0,03t^{\circ}C}, \quad (90)$$

где  $K_{10}$  — коэффициент фильтрации при температуре 10°C;  
 $Kt$  — коэффициент фильтрации при данной температуре;  
 0,7 и 0,03 — эмпирические коэффициенты;  
 $t$  — температура воды, используемой для определения водопроницаемости.

Водопроницаемость чаще всего выражают в миллиметрах водного столба за единицу времени. Это удобно потому, что осадки и испарение выражают в миллиметрах. Водопроницаемость выражают также в сантиметрах, литрах или кубометрах в единицу времени: секунды, минуты, часы, сутки.

Водопроницаемость — одно из важнейших водно-физических свойств почвы. С нею связано использование атмосферных осадков и поливной воды; при хорошей водопроницаемости осадки, а также поливная вода почти полностью проникают в почву, создавая запасы влаги и, наоборот, при плохой водопроницаемости вода стекает по поверхности, вызывая эрозию. Однако хорошая водопроницаемость может быть вредным явлением при гидротехнических работах, например, при сооружении плотин, дамб, каналов, тогда ее снижают до минимума.

Вот почему изучению водопроницаемости, ее величины, характера и способов изменения уделяют большое внимание при исследованиях почв и грунтов. Вследствие комплексного характера водопроницаемости, изучение ее в почвах естественного сложения, особенно в целях ирригации, нужно проводить с тщательным контролем.

Водопроницаемость изменяется по профилю почвы, поэтому ее следует изучать для отдельных генетических горизонтов. Особо важно знать водопроницаемость тех горизонтов, которые выходят на поверхность на дне и стенках ирригационной сети (каналов, дрена).

Для оценки водопроницаемости почвы в агрономических и мелиоративных целях употребляют шкалу Н. А. Качинского:

Оценка водопроницаемости почвы (по Н. А. Качинскому)  
напор воды ( $H$ ) = 5 см при температуре 10°С

Водопроницаемость в мм водного столба в первый час наблюдения (напор воды $H = 5$ см при температуре воды 10°С)	Оценка
свыше 1000 . . . . .	провальная
1000—500 . . . . .	излишне высокая
500—100 выравненная по всей поверхности . . . . .	наилучшая
100—70 . . . . .	хорошая
70—30 . . . . .	удовлетворительная
<30 . . . . .	неудовлетворительная

### МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ

Методы определения водопроницаемости почв и грунтов можно подразделять на полевые и лабораторные. Водопроницаемость, в основном, следует изучать в природных условиях. Лабораторные же исследования должны дополнять и углублять полевые, но не заменять их.

#### Полевые методы

При выборе метода необходимо исходить из поставленной цели, а также характера исследования (экспедиционный или стационарный). Для полевых определений водопроницаемости почв наиболее известны: 1) метод заливаемых площадей, 2) метод трубок, 3) лизиметрический.

**Метод заливаемых площадей.** К категории этих методов относят: а) метод рам и б) метод полива опытных делянок.

**Метод рам.** Рамы, имеющие различную величину и форму (круглую, квадратную, прямоугольную), врезают в почву, в них заливают воду и производят учет интенсивности впитыва-

ния ее в почву при постоянном или переменном напоре за определенные интервалы времени. Подача воды и поддержание определенного уровня ее осуществляют вручную (мерным сосудом) или автоматически с использованием водорегулирующих приспособлений, основанных на принципе сосудов Мариотта (прибор ТСХА, Князюка, Клычникова, Качинского и др.) или типа поплавков (Блинов).

Для определения водопроницаемости в практике чаще употребляют металлические или деревянные квадратные рамы. В каждом варианте определения необходимы две рамы: большая — внешняя, площадью  $50 \times 50$  см, и малая — внутренняя площадью  $25 \times 25$  см. Внутренняя рама — учетная; наружная — защитная, ограничивающая растекание воды в почве из внутренней рамы.

Высота стенок каждой рамы — 20 см, в нижней части их загачивают клином, чтобы легче можно было врезать квадрат в почву. Для металлических рам используют полосовое железо толщиной 2,5—3 мм. Углы квадратов в верхней части скрепляют угольниками из того же материала, с наружной и внутренней стороны квадраты окрашивают масляной краской. У деревянных квадратов нижнюю клинообразную часть их и верхний борт обивают нержавеющей жстью или оцинкованным железом. Углы деревянных квадратов снаружи тоже скрепляют угольниками из полосового железа, а внутри промазывают замазкой. Чтобы квадрат не впитывал воду, его несколько раз окрашивают масляной краской.

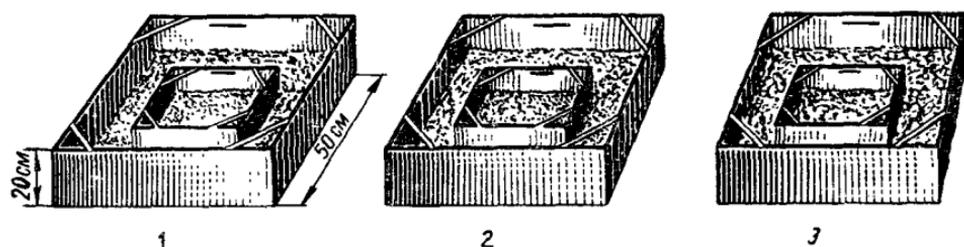


Рис. 74. Определение водопроницаемости почвы методом квадратов

*Установка квадратов* (рис. 74). Определение водопроницаемости проводят с двойным или тройным контролем. Расстояние между контрольными квадратами — 50 см. Квадраты устанавливают на типичной площадке почвы, недалеко от основного почвенного разреза. Необходимо, однако, учитывать, что разрез может играть роль дрены и близкое расположение к нему отрицательно повлияет на результаты водопроницаемости.

Площадь, где должна быть определена водопроницаемость, нужно предохранять от утаптывания и засорения.

Сначала устанавливают внешний, большой квадрат, затем внутренний. Установку квадратов производят следующим обра-

зом. Квадрат ставят на определенную для него площадку почвы, с внутренней стороны ножом намечают его границы. По намеченной границе прорезают узкую щель глубиной 8—10 см с расширением ее наружи. В заготовленную щель вставляют квадрат клинообразной его стороной и сначала вручную, а затем деревянным молотком плотно вгоняют его в щель на всю ее глубину. Устанавливая металлические квадраты, кладут по диагонали доску и по ней ударяют молотком, чтобы не деформировать углов квадрата и не разбить деревянного молотка о металл. С внутренней стороны квадрата узкой полосой (1—2 см) почву придавливают к его стенке деревянной доской или рукояткой ножа. С наружной стороны вокруг этого квадрата хорошо утрамбовывают почву. Внутренний квадрат при установке центрируют по внешнему. Так же сначала прорезается щель, в которую его плотно вгоняют, по внутренней и внешней стенкам квадрата почву придавливают полосой в 1—2 см.

*Учет водопроницаемости.* В каждом квадрате устанавливают водомерную линейку, по которой отмечают уровень воды для поддержания постоянного напора ее на поверхности почвы. В этом методе напор воды должен быть равен 5 см. Внутрь квадратов помещают термометры для учета температуры воды. Наполнение водой контрольных квадратов производят поочередно. Учетный и защитный квадраты заливают одновременно. Сначала воду подают ведрами, предварительно вымеренными, и льют на фанерные вкладыши или травяные подушечки, пока уровень ее не достигнет высоты пяти сантиметров в обоих квадратах. С этого момента начинают учет воды, которую все время подливают в квадраты уже мерными цилиндрами для поддержания постоянного уровня. Учет воды ведут по внутреннему квадрату, но и во внешнем квадрате воду поддерживают на постоянном уровне (5 см).

Учет расхода воды ведут для следующих интервалов времени: 6 отсчетов для каждых 10 мин; 4 отсчета для каждых последующих 30 мин и далее для каждого последующего часа. Водопроницаемость прослеживается на неорошаемых участках в продолжение 3—6 час, на орошаемых  $> 6$ . В каждый срок учета расхода воды записывают ее температуру. При определении водопроницаемости, особенно в жаркое время, нужно учитывать потери воды через испарение. Для этого в начале определения рядом с квадратами ставят сосуд (стакан, широкий цилиндр), доверху наполненный водой. Каждый час и в конце работы измеряют количество испарившейся воды в стакане и рассчитывают испарение в мм водного столба на единицу поверхности, что потом учитывают при расчете водопроницаемости.

Перед началом определения водопроницаемости, рядом с площадкой, где устанавливают квадраты, нужно определить влажность почвы до глубины одного метра. Образцы на влажность берут в сушильные стаканчики (алюминиевые) с тройным конт-

Водопроницаемость<sup>1</sup> почвы (в мм/мин) в

№ разреза	Почва, угодье	Влажность почвы		Интервалы наблюдений						В среднем для первого часа	Всего за 1-й час мм/час
		абсолютн. в % от веса сухой почвы	относительн. в % от общей влагоемкости	минуты							
				10	10	10	10	10	10		
1	Светлокаштановая солонцеватая суглинистая почва, целина	—	—	3,42	1,27	0,88	0,48	0,26	0,33	1,11	66,60

<sup>1</sup>) При постоянном напоре ( $H$ ) = 5 см Определение проведено с поверх

ролем каждые 10 см до глубины 50 см и через 10 см — до метра. Образцы берут с помощью бура или из стенки открытого почвенного разреза, причем в последнем случае стенку разреза зачищают на глубину 10 см.

Результаты наблюдения водопроницаемости записывают в полевой журнал по следующей форме: дата работы, пункт, название почвы и угодье, начало наблюдения, отдельными графами дают интервалы времени, а в них вписывают количество воды, прошедшей через почву в срок наблюдения, температуру воды.

Водопроницаемость вычисляют для каждого интервала времени наблюдений и выражают в мм водного столба в единицу времени по формуле:

$$K_t = \frac{Q \cdot 10}{S \cdot T}$$

Поправку на пьезометрический уклон в формулу не вводят, так как для полевых условий, при промачивании почвы на большую глубину и при напоре воды на поверхности почвы 5 см, он близок к единице и величину водопроницаемости практически не изменит.

Полученный коэффициент водопроницаемости при данной температуре приводят к температуре 10°C по формуле Хазена (90).

Из средних значений водопроницаемости в отдельный срок наблюдений (минутных) рассчитывают среднюю водопроницаемость в мм/мин для часового срока наблюдения (определяют среднюю водопроницаемость в минуту первого, второго и т. д. часа).

Водопроницаемость за час наблюдения получают путем умножения средней водопроницаемости в мм/мин на 60.

различные интервалы отсчетов при  $t = 10^{\circ}\text{C}$ 

Минуты		В среднем мм/мин для 2-го часа	Всего в мм за 2-й час (мм/час)	Минуты		В среднем мм/мин для 3-го часа (мм/мин)	Всего в мм/мин за 3 часа (мм/час)	Часы						
30	30			30	30			4-й час		5-й час		6-й час		Всего за 6 часов наблюдений (в мм)
								в среднем	всего мм/час	в среднем мм/мин	всего мм/час	в среднем мм/мин	всего мм/час	
0,31	0,67	0,49	29,40	0,31	0,44	0,37	22,20	0,32	19,20	0,27	16,20	0,26	15,60	169,20

ности почвы методом заливаемых площадей.

Величины водопроницаемости — средние из контрольных определений — оформляют в таблицу и графики.

Образец формы записи результатов определения водопроницаемости дан в табл. 37.

Результаты определения водопроницаемости оформляют графически, в виде кривых; по оси ординат откладывают водопроницаемость почвы  $K_{10}$ , по оси абсцисс — время наблюдения —  $T$  (рис. 75).

На графике можно изображать водопроницаемость по средним значениям в интервале наблюдения мм/мин или см/сек или в мм за час, а также общее количество воды за часовое наблюдение (напр. всего за 1-ый час, всего за 2-ой час и т. д.) (рис. 75).

При работе методом заливаемых квадратов учитывают характер растекания воды в почве, производя, где это возможно, зарисовку и обмер контура смоченности. Для этого по окончании определения водопроницаемости квадраты снимают, смоченная площадка укрывается от испарения (сначала клеенкой, затем сеном или соломой, слоем около 20 см). Через 24 часа (в зависимости от механического состава почвы: чем тяжелее, тем боль-

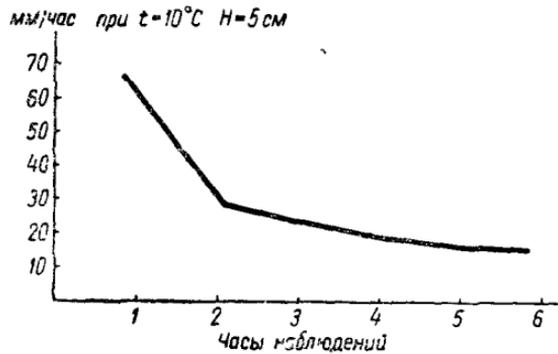


Рис. 75. Метод изображения данных по водопроницаемости почвы

ший срок требуется для установления капиллярного равновесия) для почв песчаных, супесчаных и легкосуглинистых и через 48 — для почв суглинистых и глинистых делают вертикальный разрез-траншею через центр площади внутренних квадратов по всем контролям опыта на глубину, на 30 см ниже видимой нижней границы смоченности. Для точного замера смоченную поверхность подразделяют на квадраты со стороной 10 см и воспроизводят контур на миллиметровой бумаге или по клеткам в рабочей тетради (рис. 76).

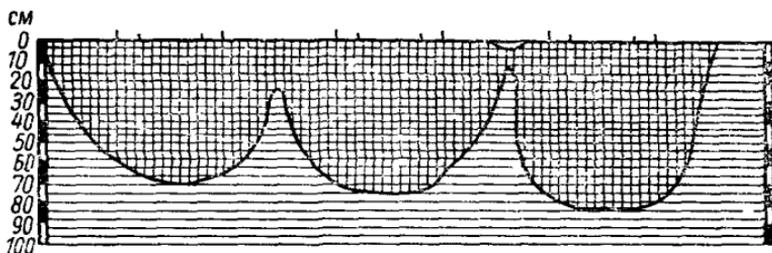


Рис. 76. Профиль смоченности после определения водопроницаемости почвы (светлокаштановая солонцеватая тяжелосуглинистая почва)

Характер растекания воды в почвах различен в зависимости от механического состава, структуры и их сложения. Контур смоченности наглядно покажет особенности почвы и послужит дополнительной характеристикой к оценке ее водопроницаемости.

На этих же площадках, под учетными (малыми) квадратами, из «освеженной» стенки разреза или буром берут пробы почвы на определение общей влагоемкости (см. гл. V).

Если водопроницаемость почвы определяют на территориях, поливаемых методом борозд, вместо квадратных употребляют прямоугольные рамы размером  $15 \times 120$  см. Три таких рамы ставят параллельно друг другу, расстояние между ними должно быть равно расстоянию между бороздами полива. Серединная рама является учетной, а крайние выполняют роль защиты от бокового растекания воды. Определение и расчет водопроницаемости ведут так же, как и в квадратных рамах.

Метод заливаемых квадратов дает количественную характеристику водопроницаемости почвы, он наиболее распространен, хотя весьма трудоемкий. Его применяют для определения водопроницаемости с поверхности почвы.

*Необходимое оборудование:* металлические рамы размером  $50 \times 50$  см — 3 шт.,  $25 \times 25$  см — 3 шт., ведра емкостью 8—10 л — 3, мерные кружки емкостью  $1000 \text{ см}^3$  — 3, емкостью  $500 \text{ см}^3$  — 3, мерный цилиндр, лопата, нож, рейки для установления и поддержания напора воды, сантиметр, часы, термометр водяной, сушильные стаканы для проб почвы на определение влаж-

ности, технические весы на 200 г с разновесами, сушильный шкаф.

Метод полива опытных делянок дает наилучшие результаты, но трудоемок, поэтому имеет ограниченное применение. Воду подают тем же способом, что и при поливе: 1) сплошным слоем (т. е. напуском), 2) по бороздам или 3) дождеванием.

Размеры и форма опытных делянок зависят от типа полива: квадратные — в случае подачи воды сплошным слоем и дождеванием, вытянутые в одном направлении — при подаче воды по бороздам. Каждую делянку обносят утрамбованным валиком высотой в 15—20 см, шириной у основания 40—60 см. Обработка почвы на делянках должна быть такой же, как на остальном поле. На подготовленную делянку подают воду и поддерживают слой в 5—10 см в продолжение всего срока наблюдения. Если водопроницаемость нужна для расчета потерь воды из оросительной системы, то наблюдения следует продолжать до установления равномерного расхода воды. Если определяется скорость впитывания и характер промачивания почвы, то срок наблюдения определяется поливной нормой.

При подаче воды сплошным слоем или дождеванием устанавливают скорость только вертикального промачивания, а при подаче воды по бороздам нужно обязательно учитывать скорость промачивания как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Это необходимо для определения типа борозд, их глубины и расстояния между ними. Расчеты и оформление полученных результатов ведут так же, как при методе заливаемых квадратов.

*Необходимое оборудование:* лопата, ведра, кружки емкостью 1000 и 500 см<sup>3</sup>, метр, рейки для определения напора, часы, термометр водяной, сушильные стаканчики для взятия проб на влажность, весы технические на 200 г с разновесом, шкаф сушильный.

**Метод трубок** по сравнению с другими менее трудоемок и не требует большого количества воды. Поэтому может быть использован в широких пределах в целях изучения варьирования водопроницаемости почвы с поверхности и по генетическим горизонтам. Необходимо большое число повторностей определения (не менее 10 трубок) по всем генетическим горизонтам. Подготавливают площадки размером 1 × 1 м, выравнивают их лопатой, не утаптывая, однако, их. При определении водопроницаемости отдельных генетических горизонтов трубки устанавливают в верхней части горизонта. После определения горизонт удаляют (снимают) и трубки устанавливают на нижележащий горизонт. При наличии большого количества трубок их можно устанавливать одновременно на разных горизонтах. В случае маломощного горизонта вода просачивается в нижележащий горизонт, поэтому для определения водопроницаемости следующую площадку для установки трубок нужно сдвинуть в сторону.

Водопроницаемость почвы методом трубок изучают с переменным и постоянным напором воды.

Метод трубок с переменным напором воды. Используют стеклянные и металлические трубки. В стеклянных трубках можно следить за изменением уровня воды и скоростью просачивания, но они хрупки, поэтому необходимо дополнительное оборудование (бурик, мех для продувания скважин). В настоящее время в полевых экспедиционных исследованиях широко используют металлические трубки диаметром 5—6 см, высотой — 13 см (на 3 см трубку погружают в почву и 10 см — начальная высота столба воды). Нижний конец трубки заострен. На подготовленную площадку устанавливают 10 трубок на рас-

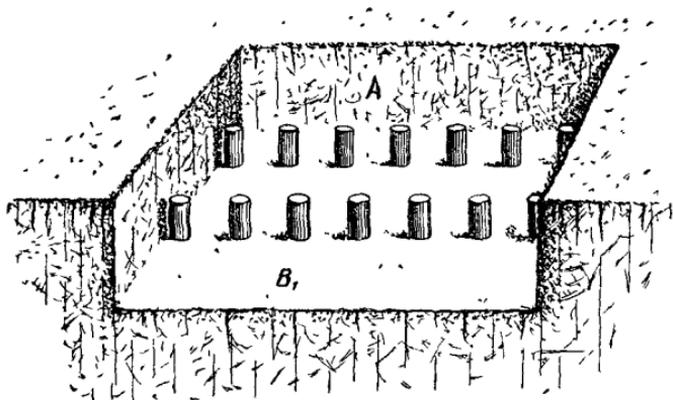


Рис. 77. Определение водопроницаемости почвы методом трубок по Н. А. Качинскому

стоянии 13—15 см одна от другой, в два ряда в шахматном порядке (рис. 77). Трубка погружается в почву надавливанием рукой или забивается деревянным молотком в случае уплотненного горизонта. С внешней стороны почва вокруг трубки уплотняется. Так как водопроницаемость в сильной степени зависит от влажности, то одновременно необходимо определить ее. Установив трубки, наливают их водой. Наливание воды производят с помощью предохранителя, чтобы сильной струей воды не нарушить поверхности почвы в трубке, и не исказить результатов. Предохранитель состоит из цилиндрической коробочки с вогнутым дном и трубки с внутренним диаметром в 3 мм. Трубка ввинчивается в коробочку. На боковой поверхности коробочки, на высоте 0,5 см от нижнего края, просверлено десять круглых отверстий с таким расчетом, чтобы суммарная площадь их поперечного сечения приблизительно в десять раз была больше площади внутреннего поперечного сечения трубки предохранителя. При таком устройстве предохранителя вода из отверстия поступает в трубку слабыми струйками.

Коробочка предохранителя делается разъемной (свинчиваю-

щейся, чтобы ее можно было чистить. К трубке присоединяется воронка через каучуковую трубочку.

Коробочку предохранителя опускают в трубку до поверхности почвы и через воронку наливают воду из чайника или кружки. По мере наполнения трубки водой предохранитель нужно постепенно поднимать, не отрывая его дна от поверхности воды. Трубки наливаются доверху, отмечается время наполнения. Так наливаются все контрольные трубки, после чего следят за временем просачивания воды в почву.

Одновременно с установкой трубок при определении водопроницаемости рядом с ними нужно поставить два стакана, налитые водой до верхнего края, для учета испарения воды, чтобы при расчете водопроницаемости ввести поправку. Особенно это важно в случаях малой водопроницаемости и длительного срока наблюдения. Обязательно нужно замерять и записывать температуру воды.

Почвы легкого механического состава имеют сравнительно выравненную водопроницаемость, и просачивание воды происходит равномерно во всех трубках. Почвы тяжелого механического состава имеют очень варьирующую водопроницаемость. В одних трубках столб воды просачивается за секунды (червоточины, трещины), в других — она может продержаться очень длительное время. В таких случаях продолжительность наблюдения ограничивают 3 час, после чего замеряют высоту столба просочившейся воды с помощью линейки. При хорошей водопроницаемости, особенно с поверхности почвы, иногда производят три наполнения трубок, что позволяет получить представление об изменении водопроницаемости почвы во времени. За окончательный итог принимают среднее из 3 наполнений.

Водопроницаемость почвы при данном методе работы выражают в мм водного столба, проходящего через единицу площади в единицу времени и рассчитывают по формуле:

$$K_t = \frac{h}{T},$$

где  $K$  — водопроницаемость почвы в мм водного столба при данной температуре;

$h$  — высота столба просочившейся воды в мм;

$T$  — время в мин или сек.

Так же, как и в других методах, водопроницаемость приводят к температуре 10°C по формуле Хазена 90.

Расчет производится для каждой трубки в отдельности. Таким образом, устанавливается вариационный ряд водопроницаемости. Затем выводится среднее значение  $K_{10}$  мм/мин для данного генетического горизонта.

Средние величины водопроницаемости представляются в таблице и графически. Ниже приводится форма записи и графического оформления результатов исследования (табл. 38).

Водопроницаемость почвы в мм/мин при  $t = 10^{\circ}\text{C}$   
(метод трубок с переменным напором)

№ разреза	Почва, угодье, пункт	Горизонт, глубина в см	Влажность почвы в момент работы		Водо- проницае- мость в мм/мин
			абсолют- ная в % от веса сухой почвы	относи- тельная в % к общей влажнос- ти	
14	Чернозем выщелочный, легкоглинистый. Пше- ница яр. по картофелю. Свердл. обл.	$A_n$ — с пов.	23,13	48,46	9,87
		$B_1$ — с 30 см	22,14	71,14	6,11
		$B_2$ — с 50 см	19,84	82,39	0,67
		$B_3$ — с 85 см	—	—	0,59
13	Солонец ореховато-глы- бистый легкоглинистый. Целина. Свердл. обл.	$A_d$ — с пов.	25,23	61,63	0,07
		$B_1$ — с 15 см	28,68	81,88	0,02
		$C$ — с 75 см	23,91	102,66	0,05
1	Дерновая среднеподзоли- стая суглинистая почва. Стерня ржи. Свердл. обл.	$A_n$ — с пов.	23,59	91,78	1,54
		$B_1$ — с 30 см	22,10	118,17	0,36

Графически водопроницаемость, определенную методом трубок, можно изобразить или столбиками, расположив их вниз.

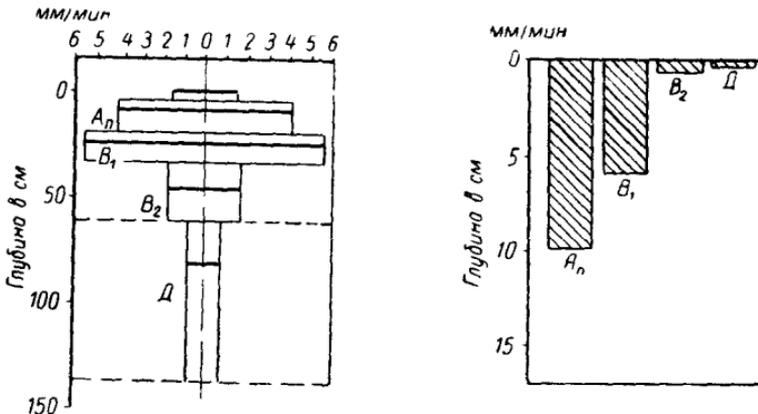


Рис. 78 Графики водопроницаемости почвы, определенной методом трубок по Н. А. Качинскому

считая поверхность почвы за 0, или фигурами по профилю почвы (рис. 78). От центра фигуры откладывают равные отрезки в ту и другую сторону.

Необходимое оборудование: трубки, распылитель, чайник, кружка, ведро, линейка, термометр, лопата, нож, сушильные стаканчики.

Определение водопроницаемости почвы методом трубок с постоянным напором. На кафедре физики и мелиорации почв МГУ разработан прибор, позволяющий определять водопроницаемость почв в их естественном сложении в поле и в лаборатории на монолитных образцах.



Рис. 79. Прибор для определения водопроницаемости почв трубками с постоянным напором:

1 — цилиндр, 2 — мариоттово приспособление, 3 — металлическая, режущая часть цилиндра, 4, 5 — крышки, 6 — редукционный клапан, 7 — защитная металлическая пластина, 8 — металлический кофак

Основная часть прибора (рис. 79) — рабочий цилиндр — 1 с трубкой — 2, изготовленные из прозрачного плексигласа. Трубка служит для установления постоянного напора по принципу Мариотта. Верхний край цилиндра окантован металлическим кольцом с винтовой нарезкой с внешней стороны. Нижним концом цилиндр (на резьбе и заклепках) причленен к металлическому буру 3 высотой 3 см, диаметр нижней режущей части которого на 1 мм меньше диаметра его внутренней цилиндрической части. Благодаря этому погружаемый в почву цилиндр не деформирует ее. Между металлическим буром и прозрачным цилиндром вставлено выпуклое внутрь цилиндра дно с 16 равномерно расположенными отверстиями диаметром 4 мм для предохранения почвы от размыва водой во время заполнения ею цилиндра.

Сверху цилиндр герметически закрыт крышками — верхней — 4 и нижней (внутри) — 5. Верхнюю крышку навертывают на оправу и прижимают нижнюю. Герметичность соединения обеспечивается резиновой прокладкой, помещенной между нижней

крышкой и оправой цилиндра. Трубку — 2, входящую внутрь цилиндра, закрепляют во втулке нижней (неподвижной) крышки посредством гайки и резиновой прокладки. На верхний конец трубки надет металлический наконечник. Верхняя часть цилиндра снабжена редукционным клапаном — 6, предназначенным для выпуска воздуха из цилиндра при заполнении его водой через трубку — 2. Для большей устойчивости цилиндр соединен с буром тремя тонкими металлическими пластинками — 7. На стенке цилиндра нанесена градуировка в линейных единицах (в см) и в единицах объема (см<sup>3</sup>). Трубка — 2 также отградуирована в линейных единицах.

Конструкция прибора позволяет определять водопроницаемость почвы при переменном и постоянном напоре. Для определения водопроницаемости с переменным напором крышки с цилиндра снимают и воду заливают непосредственно в цилиндр до соответствующей отметки, замечают время и наблюдения ведут при открытом цилиндре.

Для определения водопроницаемости при постоянном напоре воду заливают в закрытый цилиндр через трубку, установленную на определенной высоте от дна соответственно задаваемому давлению. Прибор работает с постоянным напором только при условии герметичности, когда воздух входит только через узкую трубку — 2.

*Установка цилиндров.* Наличие пяти одинаковых цилиндров в приборе позволяет вести наблюдения с контролем. Перед установлением цилиндра в почву крепко завинчивают крышку. Трубка — 2 при этом должна быть ослаблена и опущена до конца в цилиндр.

Цилиндры расставляют на подготовленной площадке размером 1×1 м и погружают в почву на глубину, соответствующую высоте металлического бура. Для этого на цилиндр одевают боек — 8 и если почва рыхлая, то цилиндр входит в почву от надавливания на него рукой. В твердую почву цилиндр погружают ударяя по бойку деревянным молотком. Установив цилиндр, уплотняют вокруг него почву. Поднимают узкую трубку — 2 и закрепляют ее гайкой на соответствующей отметке по высоте, т. е. на требуемый напор. Отвернув на 2—3 оборота винт редукционного клапана — 6, вставляют в трубку воронку и заливают в цилиндр воду до верхней отметки по объему или высоте. Завернув до отказа винт клапана цилиндра, замечают и записывают время начала наблюдений. Так поочередно наливают все пять цилиндров и ведут наблюдения за количеством просочившейся воды в определенный интервал времени. Просочившуюся воду восполняют новой, но перед этим необходимо записать точный объем или высоту оставшейся воды.

Подобно методу квадратов, здесь приняты следующие интервалы времени: 6 отсчетов каждые 10 мин, 4 отсчета каждые 30 мин и затем через час. Общая продолжительность наблюде-

ний зависит от цели. Водопроницаемость рассчитывают в мм водного столба за единицу времени (*мин*) и приводят к температуре 10°C, как по методу трубок, если учет велся по высоте столба воды, или как по методу заливаемых площадей, в случае учета просочившейся воды по объему.

Результаты наблюдений оформляют в таблицу и график по образцу водопроницаемости, полученной методом квадратов.

Метод трубок может быть рекомендован для определения водопроницаемости на территориях с большим уклоном, так как в приборах с большой площадью напор воды в разных точках не одинаков.

**Лизиметрический метод.** Применение его возможно в полевых стационарных и полустационарных условиях. В почвенной и гидрологической практике известны два типа лизиметрических исследований: 1) изолированные почвенные колонны и 2) лизиметры-воронки.

**Метод изолированных почвенных колонн.** Высота, а также площадь поперечного сечения почвенной колонны из естественного или насыпного грунта могут быть различны в зависимости от поставленной цели.

Для заложения лизиметрического опыта в естественных условиях с ненарушенной почвой на исследуемой территории выбирают типичный участок, с поверхности очерчивают площадь, соответствующую основанию колонны (1, 2, 4 см<sup>2</sup>), которую окапывают с четырех сторон на заданную глубину (1—2 м). После описания почвенного профиля стенки колонны обмазывают грязью, приготовленной из соответствующего горизонта этой почвы, слоем толщиной 0,5 см и обертывают целым куском клеенки. Необходимо следить, чтобы клеенка плотно прилегала к стенкам, в противном случае подаваемая на поверхность колонны вода просочится сквозь щели, между почвой и клеенкой. Подготовленную колонну засыпают почво-грунтом с соблюдением порядка расположения горизонтов. На поверхности изолированной колонны устанавливают деревянную или металлическую раму, равную ей по площади, в случае большой площади колонну обваловывают земляным валиком высотой 15—20 см. Водопроницаемость определяют вышеописанным методом заливаемых площадей.

Для определения скорости и глубины просачивания воды по высоте колонны устанавливают электроды, провода которых выводят на поверхность и с помощью регистрирующего прибора определяют изменение электропроводности. О степени смоченности горизонта судят по уменьшению электросопротивляемости почвы. Недостаток метода — изолированность от окружающей площади и вследствие этого искусственное устранение бокового движения воды.

**Лизиметры-воронки** устанавливают в нишах под различными генетическими горизонтами почвы. С помощью тру-

бок воронки соединяют с водоприемниками, установленными в открытом почвенном разрезе и служащими для сбора фильтрующейся воды. Воронки изготовляют из оцинкованного железа, можно использовать также фарфоровые воронки Бюхнера. Диаметр воронок должен быть не менее 20—25 см, глубина — 5 см, верхний край воронки загнут вверх, имеет высоту 0,5 см и заострен. На горле воронки укрепляют толстостенную каучуковую трубку, длина которой соответствует расстоянию от воронки до приемника. Горловину воронки закрывают свинцовой пластинкой с просверленными отверстиями диаметром 2—3 мм. Конусообразную часть заполняют промытым гравием, на который накладывают вторую свинцовую пластинку с отверстиями диаметром 1—2 мм.

*Установка воронок.* В открытом почвенном разрезе под каждым генетическим горизонтом выкапывают нишу, через которую воронку подводят и врезают в нижнюю часть соответствующего горизонта. Необходим тесный контакт между почвой и содержимым воронки. Установив под каждый горизонт по две воронки, ниши тщательно закрывают тем же материалом, который был вынут из них. Воронки устанавливают снизу вверх. Затем часть разреза, примыкающую к воронкам на расстоянии 1 м, постепенно засыпают. Насыпав грунт до глубины нижней воронки, его тщательно уплотняют и укладывают на его поверхность отходящую от воронки трубку, а затем засыпают разрез до поверхности. Насыпную стенку обшивают досками с отверстиями для отводных трубок, под которые подставляют стеклянные сосуды-водоприемники. По количеству профильтровавшейся воды судят о водопроницаемости отдельных генетических горизонтов почвы, фильтрат может быть использован также для изучения продуктов выноса.

Основной недостаток этого метода тот, что неизвестна площадь, с которой фильтруется вода, поэтому водопроницаемость отдельных горизонтов получает относительную характеристику.

**Лабораторные методы.** Лабораторные методы не могут заменить полевые исследования, но они позволяют углубить изучение этого вопроса. В лабораторных условиях возможно изучение водопроницаемости по отдельным процессам: впитывания, фильтрации. В лаборатории возможно широко изменять условия опыта и, таким образом, выявлять влияние различных факторов на величину водопроницаемости. Точность лабораторного метода зависит от объема исследуемого образца (чем больше образец, тем точнее результаты). В основном, эти методы можно свести к двум категориям: 1) определение водопроницаемости почв и грунтов ненарушенного сложения; 2) определение водопроницаемости насыпных образцов.

Предложен, кроме того, ряд эмпирических или теоретических формул для расчета водопроницаемости по механическому составу и пористости (см. гл. I).

**Метод монолитов** дает результаты, приближенные к результатам полевых исследований, при этом можно в более широких пределах изменять условия опыта. Описание приемов монтирования монолита приведено в гл. V (см. рис. 69).

Для определения скорости впитывания и глубины промачивания в монолит во время его монтирования на границах каждого горизонта закладывают электроды и пьезометры (последние представляют собой изогнутые стеклянные трубки). Их вставляют в боковые стенки монолита на глубину 1—1,5 см. Входные отверстия пьезометров закрывают ватой для предохранения от засорения почвой. Пьезометры закрепляют на доске, около каждого из них наклеивают полоску из миллиметровой бумаги для градуировки трубки по высоте. Для измерения электропроводности почвы используют прибор типа мостика Уитстона. Электроды, изготовленные из медной или алюминиевой проволоки диаметром 2—3 мм, вставляют в почву на глубину 5 см, на расстоянии 10 см друг от друга, или по генетическим горизонтам.

Для этих же целей можно использовать прибор Вильямса — Саввинова в модификации МГУ.

**Определение водопроницаемости насыпных образцов.** Методы этой категории имеют ограниченное применение в агрономической практике, но иногда они бывают необходимы при оценке способов рассолонцовывания, оструктурирования, а также для определения водопроницаемости почв легкого механического состава; значительно чаще этот метод используют грунтоведы и гидрогеологи для характеристики водопроницаемости в насыпных сооружениях.

Используют стеклянные или металлические трубки диаметром 4—5 см при высоте 20—100 и более см, в зависимости от поставленной цели. Нижний конец трубки обвязывают марлей или тонкой сеткой, на дно трубки кладут кружок из фильтровальной бумаги. На наружной стенке стеклянной трубки наклеивают полоску из миллиметровой бумаги. Трубку загружают почвой, пропущенной через сито с диаметром отверстий 1 или 3 мм, почти до верха (на 6—7 см ниже верхнего края трубки). Во избежание отсортировки материала почву насыпают в трубку через воронку, на которую одевают каучуковую трубку. Плотность почвы по всему заполненному объему трубки должна быть равномерной, а объемный вес — таким, как в природных условиях. Поэтому почву в трубку загружают послойно (по 2—3 см), уплотняя постукиванием трубки о что-либо мягкое (тетрадь, книгу) или с помощью деревянной трамбовочки. По весу и объему почвы в трубке рассчитывают ее объемный вес и порозность. Подготовленную трубку с почвой устанавливают на воронке, трубку и воронку укрепляют на штативе. Поверхность почвы в трубке покрывают кружком фильтровальной бумаги для предохранения от размывания. Воду подают в почву под постоянным напором в 5 см, поддерживаемым с помощью приспособления по принципу

Мариотта. Для этой цели используют мерный цилиндр емкостью 200 — 250 см<sup>3</sup>, который закрывают пробкой со вставленной стеклянной трубкой, конец которой выходит из пробки и косо срезан. Цилиндр наполняют водой и, закрыв, опрокидывают над трубкой с почвой. Конец трубки, выходящий из цилиндра, должен быть на 5 см выше поверхности почвы в трубке. Под воронку ставят мерный цилиндр или стакан для сбора и учета фильтрующейся воды. После установления напора воды над почвой в трубке записывают время начала впитывания, учитывают расход воды по уменьшению ее в мерном цилиндре каждые 5—10 мин и одновременно записывают глубину промачивания. Появление первой капли фильтрата в нижнем конце трубки следует считать концом процесса впитывания и началом фильтрации. Определяют количество профильтровавшейся воды за определенные интервалы времени: через каждые 10 мин в течение первого часа, через каждые 30 мин в течение второго и третьего часов и затем через часовые интервалы, до получения одинаковых значений  $K$ . Одновременно необходимо отмечать температуру воды, используемой при работе.

Коэффициенты впитывания или фильтрации рассчитывают по формуле.

$$K_t = \frac{Q}{S \cdot T},$$

где  $K$  — коэффициент впитывания или фильтрации в мм/мин или см/сек при данной температуре,

$Q$  — расход воды в мм<sup>3</sup> или см<sup>3</sup> (по сосуду Мариотта или по количеству собранного фильтрата) за все время (минуты или секунды),

$S$  — площадь сечения трубки в см<sup>2</sup>,

$T$  — время в сек, мин или час.

Приводят расчеты к температуре 10°C (по формуле 90). Полученные результаты оформляют в таблицу и график, где на оси ординат откладывают величины  $K_{10}$ , а по оси абсцисс — время  $T$ .

**Определение водопроницаемости в приборе Тима.** В приборе Тима определяют коэффициент фильтрации образцов с нарушенной структурой при подаче воды сверху.

Прибор (рис. 80) состоит из металлического цилиндра (1) диаметром 10 см, высотой 40 см с глухим дном. В центральную часть цилиндра вмонтированы три боковых патрубка на расстоянии 10 см один от другого. Внутри цилиндра отверстия патрубков закрыты тонкой проволочной сеткой, резиновыми трубками они соединены со стеклянными трубками, служащими для измерения пьезометрического уровня воды на соответствующей высоте цилиндра (2).

Пьезометрические трубки закреплены на доске с миллиметровой шкалой.

Вверху и внизу цилиндра — патрубки: верхний для оттока

воды, сверх установленного уровня, к нижнему присоединена резиновая трубка (3), служащая для подачи воды во время загрузки цилиндра образцом, а затем для регулирования напора и стока фильтрующейся воды во время опыта. На металлической платформе закреплен цилиндр и стойка, отградуированная на сантиметры. Регулирующая трубка (3) с помощью специального держателя может быть передвинута по высоте стойки, что обуславливает соответствующий напор воды в цилиндре. Внутренние стенки цилиндра смазывают лаком и присыпают песком; созданная таким образом шероховатая поверхность препятствует току воды между стенкой и образцом. Цилиндр для работы устанавливают на столе, а выше его — на полке или подставке — помещают сосуд с тубусом, из которого подают воду в цилиндр (4).

Перед загрузкой прибора образцом соединяют водопадающую трубку через тройник с регулирующей трубкой, свободный конец которой укреплен в держателе и может перемещаться по высоте стойки.

**Загрузка прибора.** На дно цилиндра насыпают гравий, причем сначала заливают воду, а потом опускают гравий слоем в 2 см, что

устраняет воздушные промежутки. На гравий насыпают грубозернистый песок слоем в 2 см, а затем слоем в 1 см мелкозернистый песок. Понижают уровень воды на 1—2 см ниже поверхности загружаемого материала и последний утрамбовывают деревянной трамбовкой. Подготовленный таким образом слой служит подстилкой и фильтром для исследуемого образца; он задерживает вымываемые из образца при опыте мелкие частицы.

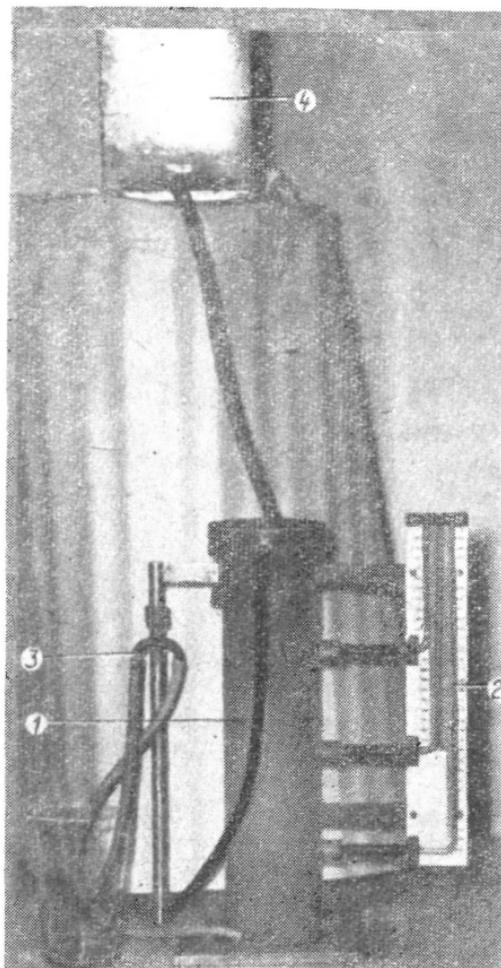


Рис. 80. Прибор Тима для определения фильтрации:

1 — цилиндр для почвы, 2 — пьезометры, 3 — уравнительная трубка, 4 — сосуд с водой

Испытуемый образец тщательно перемешивают и ложкой с удлиненной ручкой переносят в цилиндр. Засыпку образца ведут небольшими порциями и обязательно с небольшой высоты (во избежание воздушной сортировки). Насыпав слой в 2—3 см, его уплотняют деревянной трамбовкой до тех пор, пока образец не увлажнится поднявшейся капиллярной водой. Затем, не поднимая уровня воды, насыпают новый слой; уложив несколько слоев, поднимают уровень воды на 1—2 см. Мощность слоя испытуемого образца в цилиндре — 10 см.

На слой испытуемого образца насыпают слой грубозернистого песка, затем гравия, назначение которых — предохранить почву от размывания струей воды, поступающей сверху во время опыта.

Увеличивая постепенно напор (поднятием регулирующей трубки), насыщают образец до тех пор, пока вода не появится на поверхности гравия, после чего подачу воды снизу прекращают. Отсоединив регулирующую трубку (3) от водоподводящей трубки, закрепляют ее на штативе на уровне верхнего патрубка. Водоподводящую трубку (4) переводят на верх цилиндра, открывают зажим и наполняют цилиндр водой до отверстия верхнего патрубка. После этого устанавливают такой ток воды, чтобы уровень ее в цилиндре над образцом стоял на одной высоте в продолжение всего опыта.

*Проверка прибора.* Перед началом опыта необходимо проверить работу пьезометров. Для этого регулирующую трубку закрепляют на стойке на высоте верхнего патрубка. При таком положении движение воды через образец не должно происходить и уровень ее во всех пьезометрах должен быть одинаковым. В песке и почве легкого механического состава при исправности прибора уровень устанавливается быстро, в образцах маловодопроницаемых это происходит очень медленно, за несколько часов. При неисправных пьезометрах одинаковый уровень не устанавливается очень долго.

После проверки прибора начинают опыт, сущность которого заключается в определении скорости фильтрации при различных градиентах напора.

*Ход опыта.* Регулирующую трубку (3) устанавливают на высоте середины верхней трети испытуемой колонки грунта, что создает напорный градиент, и происходит фильтрация воды. Фильтрующаяся вода начинает стекать через регулирующую трубку.

После установления постоянного уровня воды в пьезометрах производят отсчеты показаний по пьезометрам и вычисляют разность уровней воды в них, а также замеряют расход воды в определенные интервалы времени. Для этого под регулирующую трубку подставляют мерный сосуд. При данном напоре делают 2—3 замера и записывают температуру используемой воды.

Определения коэффициента фильтрации необходимо провести не менее чем при трех различных силах напора. Увеличивая градиент напора, регулируемую трубку устанавливают при втором опыте на середине, а при третьем — на высоте середины нижней трети испытываемой колонны. После установления постоянного уровня в пьезометрах и постоянства расхода воды определяют разность напора по пьезометрам и расход воды во времени.

Коэффициент фильтрации вычисляют по формуле Дарси:

$$K = \frac{Q}{S \cdot I},$$

где  $K$  — коэффициент фильтрации;

$Q$  — расход воды в единицах объема за единицу времени в мм/мин, см/сек, см/час и т. д. (получается делением

объема профильтровавшейся воды на время  $Q = \frac{V}{T}$ ),

$S$  — площадь сечения цилиндра в см<sup>2</sup>;

$I$  — напорный градиент, равный отношению среднего напора (разница показаний пьезометра в см) к длине пути фильтрации (расстояние между пьезометрами), т. е.

$$I = \frac{h}{l}.$$

Полученные результаты приводят к температуре 10°C. Вычисления даются для каждого напора отдельно. Например:

Показания первого пьезометра =  $h_1 = 25$

Показания второго пьезометра =  $h_2 = 20$

Разница показаний  $h = h_1 - h_2 = 25 - 20 = 5$

$l = 10$  см

$$I = \frac{5}{10} = 0,5.$$


---

## ГЛАВА VIII

### МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ПОЧВЫ

Испарение — процесс перехода воды из жидкого в парообразное состояние вследствие теплового движения молекул воды. Скорость этого движения возрастает с увеличением температуры, вместе с тем увеличивается и испарение.

Образование пара в поверхностных слоях почвы и передвижение его в атмосферу влечет за собой иссушение почвенной толщи. На испарение 1 г воды затрачивается 600 кал тепла, таким образом, испарение влаги почвой и растениями — мощный фактор их охлаждения.

Различают суммарное испарение — с поверхности почвы + растениями, физическое — испарение только с поверхности почвы, и биологическое — транспирационное.

Испарение с поверхности водных бассейнов называют испаряемостью.

Испаряемость характеризует потенциальную возможность испарения при данных условиях среды и определяется, главным образом, притоком тепла.

По аналогии с испаряемостью с водной поверхности испаряемость из почвы определяют как величину испарения влаги из водонасыщенной почвы при постоянном притоке воды в испаряемую толщу почвы.

Для измерения величины испарения используют расчетные методы, в основе которых лежит связь гидрометеорологических характеристик с суммарной величиной испарения и определяют испарения при помощи приборов разной конструкции.

#### Расчетные методы

Определение суммарного испарения  $E$  в мм за месяц при средней месячной температуре  $T^\circ$  и относительной влажности воздуха —  $a$  производят по формуле Иванова:

$$E = 0,0018(25 + T^\circ)^2 \cdot (100 - a). \quad (91)$$

В формуле учитывают влияние температуры и влажности воздуха на испарение. Формула проверена на больших водоемах с удовлетворительными результатами. По этому методу значение  $E$  вычисляют довольно просто.

Метод турбулентной диффузии:

$$E = 2,1K\Delta e, \quad (92)$$

где  $K$  — коэффициент турбулентной диффузии на высоте  $1$  м в  $\text{м}^2/\text{сек}^{-1}$ ,

$2,1$  — эмпирический коэффициент,

$\Delta e$  — разность влажности воздуха в  $\text{мб}$ , измеренная на разных высотах ( $Z_1$  и  $Z_2$ ), например,  $200 \text{ см} - Z_2$  и  $20 \text{ см} - Z_1$ .

Величину  $K$  вычисляют по формуле:

$$K = 0,104\Delta U \left( 1 + 1,38 \frac{\Delta t}{\Delta U} \right) \text{м}^2/\text{сек}, \quad (93)$$

где  $\Delta U$  — разность скорости ветра,

$\Delta t$  — разность температуры на высоте  $Z_1$  и  $Z_2$ .

Для определения величины —  $E$  устанавливают психометры Ассмана и анемометры на высоте  $Z_1$  и  $Z_2$ . По показаниям психрометров вычисляют  $\Delta t$ ,  $\Delta e$ , анемометров —  $\Delta U$ . Однако удовлетворительной схемы расчета пока еще не дано.

Метод теплового баланса. В этом методе суммарное испарение вычисляют по формуле:

$$E = \frac{R - B}{60 \left( 1 + 0,64 \cdot \frac{\Delta t}{\Delta l} \right)}, \quad (94)$$

где  $R$  — радиационный баланс, измеряемый балансомером в  $\text{кал}/\text{см}^2/\text{час}$ ;

$\Delta t$  — разница температуры воздуха на разных высотах  $Z_1$  и  $Z_2$ ;

$\Delta e$  — разница влажности воздуха в  $\text{мб}$  на разных высотах  $Z_1$  и  $Z_2$ ;

$B$  — тепловой поток в почву  $\text{кал}/\text{см}^2/\text{час}$ , рассчитываемый с помощью формулы:

$$B = \lambda \frac{dt}{dz},$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, определяемый экспериментально;

$\frac{dt}{dz}$  — градиент температуры изучаемой толщи почвы. Определение градиента производят на основании измерений температуры почвы по отдельным горизонтам до глубины  $1$  м.

Величина  $\frac{dt}{dz} = \frac{t_1 - t_2}{Z}$ ,

где  $t_1$  и  $t_2$  — температура верхней и нижней части слоя почвы,  $Z$  — толщина слоя.

Метод теплового баланса громоздкий, сложный и мало разработан.

## Лабораторные методы

Метод трубок. Стекланные трубки длиной 20—25 см обвязывают снизу марлей с фильтром, заполняют почвой и устанавливают в деревянную подставку. Электрической лампой сверху нагревают поверхность почвы в трубке и вентилятором подают воздух, создающий ветер определенной силы. Для контроля постоянства температуры и ветра в течение дня производят 3—5 определений температуры и силы ветра (анемометром) на поверхности почвы. Величину испарения определяют по весу, производя взвешивание трубок раз в сутки или раз в пять дней, в зависимости от интенсивности испарения и поставленной задачи или вычисляют в мм водного столба, пользуясь формулой  $E = \frac{a \cdot 10}{S \cdot T}$ , где  $a$  — потеря в весе трубки в г,  $S$  — площадь ее в см<sup>2</sup>,  $T$  — интервал времени.

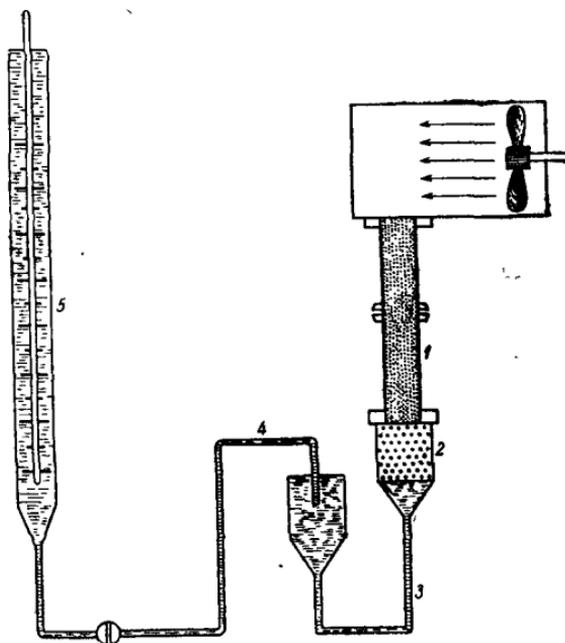


Рис. 81. Установка для определения испарения влаги из водонасыщенной почвы при постоянном притоке воды:

1 — цилиндр с почвой, 2 — воронка с сетчатым дном, 3 — резервуар для воды, 4 — ключ, 5 — бюретка

Испарение влаги из водонасыщенной почвы при постоянном притоке воды в ее толщу можно определить с помощью установки, предложенной Дерягиным и Мельниковой (1956) (рис. 81).

Цилиндр (1) высотой 20—30 см с почвой, просеянной через

трехмиллиметровое сито и доведенной до капиллярного насыщения, устанавливают над воронкой с сетчатым дном. Воронка (2) наполнена крупным песком и соединена с резервуаром для воды (3). Расход воды из резервуара по мере всасывания ее почвой пополняется при помощи системы Мариотта, состоящей из аналитической бюретки (5) и ключа (4), соединяющего резервуар с бюреткой. Показания бюретки и дают количество израсходованной воды при испарении за изучаемый промежуток времени. Вентилятор над колонкой почвы способствует более быстрому испарению воды из нее.

С помощью установки можно изучать испарение в зависимости от структуры почвы, ее механического состава и других факторов. Кроме того, авторы применяли установку для определения зависимости водопроводности почвы от ее влажности.

Расчет величины испарения —  $E$ . Расход воды, учитываемый с помощью бюретки, равен —  $Q$  мл. Площадь поперечного сечения почвенной колонки 9 см и длительность наблюдения —  $T$  время (в час). Определяют испарение по формуле:  $E = \frac{Q \cdot 10}{S \cdot T}$  мм/см<sup>2</sup>/час.

### Полевые методы

Метод водного баланса почвы. Баланс почвенной влаги складывается из ее накопления и расхода.

Если накопление влаги за счет осадков обозначить как  $Q$ , конденсацию парообразной влаги —  $P$ , капиллярный подток —  $B$ , расход (общее испарение) —  $E$ , изменение запасов влаги за срок наблюдений  $\pm (A - B)$ , где  $A$  — запас влаги в исследуемом слое почвы в начале срока,  $B$  — то же в конце, сток поверхностный —  $C$ , внутрпочвенный —  $C_1$ , инфильтрация воды за пределы изучаемой толщи —  $\Phi_{ин}$ , то в сумме:

$$(Q + P + B) - E \pm (A - B) - (C + C_1 + \Phi_{ин}) = 0.$$

Откуда  $E = (Q + P + B) - (C + C_1 + \Phi_{ин})$ .

В степных условиях при глубоком залегании грунтовых вод и отсутствии капиллярного подтока и стока в летний период, пренебрегая незначительной величиной  $P$ , испарение

$$E = \frac{Q + (A - B) - \Phi_{ин}}{T}, \quad (95)$$

где  $T$  — время в сутках.

При наличии стока весной испарение по формуле 95 рассчитывать нельзя. Величину  $\Phi_{ин}$  легко определить по изменению запасов влаги в нижеследующих горизонтах. Метод измерения  $E$  в этом случае можно назвать методом изучения динамики влажности почвы во времени.

Для определения  $E$  выделяют специальную, типичную для данных условий площадку размером  $2 \times 2$  м. Почву увлажняют поливом из расчета промачивания слоя 0 — 50 или 0 — 100 см

(табл. 39); после снеготаяния не поливают. Площадку закрывают соломой или травой и на второй день определяют исходную влажность. Вначале влажность почвы до глубины 150 — 200 см определяют 2 — 3 раза через каждые 5 дней, затем через 10. В первом метре пробы на влажность отбирают в каждом 10-сантиметровом слое с тройной повторностью, во втором — через 10 см с двойной повторностью. Для сокращения проб все контрольные образцы берут в один бюкс. Влажность вычисляют в % или мм водного столба в каждом слое и в мм по слоям 0—50, 50—100 см и т. д. Определяют приход или расход влаги за срок наблюдения ( $A-B$ ). Зная количество осадков за этот срок, вычисляют  $E$  в мм/сутки по формуле 95.

Таблица 39

Измерение запасов влаги (в мм)

Слой почвы в см	Степь		Лесной колос					
	10.V	20.V	1.VI	12.VI	10.V	20.V	1.VI	12.VI
Осадки . . . . .	0	0	0	0	0	0	0	0
0—50 . . . . .	0	-40	-10	-10	0	-30	-10	-16
50—100 . . . . .	0	+ 4	0	- 4	0	0	-20	-22

Примечание: Наблюдения производили в Тингутинском лесхозе, близ Волгограда. Полив площадок произведен 8.V, а 10.V — определение исходной влажности почвы.

Пример: уменьшение запасов влаги в слое 0—50 см (табл. 39) степной делянки за период с 10. V по 12. VI составляло 70 мм. Осадков выпало 10 мм: фильтрация за пределы данного слоя  $\Phi_{ин} = 4$  м. В среднем за сутки испарение

$$E \frac{\text{мм}}{\text{сут.}} = \frac{10 + 70 - 4}{36} = 2,1.$$

По Высоцкому, в лесу общее испарение можно расчленить на биологическое и физическое. Выбирают площадку без леса, но в тени деревьев, и окапывают ее канавой глубиной 60 — 80 см, чтобы влага ее не расходовалась соседними деревьями. Вторую площадку располагают так, чтобы в центре было дерево, вокруг которого производят бурение по окружности радиусом 50—60 см (от ствола дерева). На второй площадке определяют величину суммарного испарения, на первой — испарение с поверхности почвы. Разница этих величин показывает величину биологического транспирационного испарения.

Д. Р. Константинов (1954), сопоставляя различные методы определения испарения с поверхности почвы, пришел к выводу, что наилучшие результаты получают при использовании испарителей.

## Почвенные полевые испарители

Для определения испарения применяют испарители различной конструкции: Попова, Государственного гидрологического института (ГГИ), испаритель лаборатории физики почв МГУ — П-3, Рыкачева, испарители, построенные по принципу гидростатического взвешивания, компенсационные испарители Жилинского и др.

Величину испарения определяют повторным взвешиванием монолита почвы в металлическом или деревянном корпусе сосуда-испарителя. Недостатком испарителей такого типа следует считать трудность получения результатов и их малая точность при большом весе монолита, уменьшение же веса монолита увеличивает ошибку определения.

Удовлетворительные результаты можно получить при использовании монолитов с площадью сечения  $500\text{--}1000\text{ см}^2$ , глубиной  $50\text{--}100\text{ см}$  и весом  $40\text{--}60\text{ кг}$ . При увеличении глубины площадь сечения испарителя уменьшают. В испарителе часто наблюдают ухудшение развития растений и большее высыхание почвы по сравнению с естественными условиями, поэтому почву и растение в испарителе необходимо сменять два раза в месяц в засушливых и один раз в месяц в обычных условиях.

Испаритель Попова (рис. 82) состоит из двух цилиндрических сосудов из оцинкованного железа: внутреннего (1), в который помещают монолит почвы, и внешнего, защитного (2). Размер внутреннего цилиндра: высота  $27,5\text{ см}$ , площадь сечения  $500\text{ см}^2$ , дно (1) цилиндра из латунной сетки. В зависимости от поставленной задачи высоту цилиндра (глубину) можно увеличить. Верхний край цилиндра имеет выступающие запяски, которые закрывают щель между ним и внешним цилиндром. Цилиндр загружают почвой. Для вырезки почвенного монолита используют специальный струг (6), состоящий из каркаса, заканчивающегося ножом, и цилиндра, по размерам равного внут-

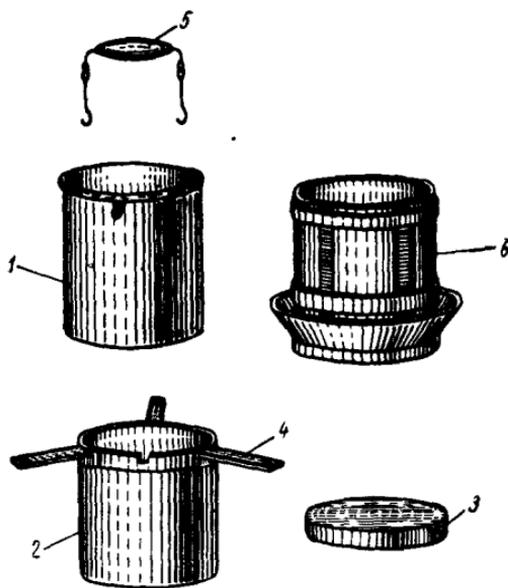


Рис. 82. Испаритель Попова:

1 — внутренний цилиндр, 2 — внешний цилиндр,  
3 — водосбор, 4 — лапки, 5 — ручка, 6 — струг

ренному цилиндру испарителя. В поле окапывают монолит почвы по размерам несколько больше цилиндра. Сверху на него накладывают струг, обрезают и надвигают цилиндр. Взятый монолит перекадывают в испаритель, последний устанавливают во внешний цилиндр. Внешний цилиндр (2) имеет диаметр на 2—5 мм и высоту на 30 мм более внутреннего. Установленный, он опирается на поверхность почвы тремя лапками-пластинами (4), на дне его устанавливают водосбор (3).

При взятии почвенного монолита внутренний цилиндр вгоняют в почву и окапывают. После взятия почвы монолит опускается во внешний цилиндр, установленный в почве. При взвешивании ручкой (5) цилиндр с почвой цепляют за ушки и извлекают из почвы. Взвешивают раз в сутки, в 19 час при интенсивном испарении влаги из почвы при низкой влажности. При слабом испарении — 1 раз в 5 или 10 дней. Форма записи наблюдения испарения приведена в табл. 40.

Расчет. 1) Если за сутки вес испарителя уменьшился на 72 г, то испарение  $E \frac{\text{мм}}{\text{сутки}} = \frac{72 \cdot 10}{500}$ , где 500 — площадь сечения испарителя, 10 — переводной коэффициент см в мм.

2) За двое суток выпало 10 мм осадков (1 см), вес поступивших в испаритель осадков —  $10 = 1 \text{ см} \cdot 500 \text{ см}^2 = 500 \text{ см}^3 = 500 \text{ г}$ . Вес испарителя за сутки увеличился на 150 г, в водосбор просочилось 250 г.

$$\text{Испарение } E \frac{\text{мм}}{\text{сутки}} = \frac{[500 - (250 + 150)] \cdot 10}{500} = 2.$$

Таблица 40

Формы записи наблюдений испарения

№ испар.	Дата	Осадки в мм	Вес испарителя первоначальный	Вес в срок наблюдения	Разница в весе ±	Просоч. воды в поддон	E мм/сут	Примечание
	1/I	—	—	—	—	—	—	—
	2/V	—	—	—	—	—	—	—
	10/IV	—	—	—	—	—	—	—
	Испарение за декаду в мм	—	—	—	—	—	—	—

Почвенный испаритель ГГИ-500 состоит из двух испарителей, дождемера и весов в будке. Устройство его, в принципе, сходно с испарителем Попова: дождемер состоит из цилиндрического ведра и гнезда в виде конуса для установки. Приемная площадь дождемера 500 см<sup>2</sup>. Весы на 150 кг помещают в специальной будке с отверстиями для установки испарителя и откидной двускатной крышей.

На почвенной площадке с испарителями все приборы устанавливают по одной прямой на расстоянии 3 м друг от друга,

кроме весов, которые удаляют на 8—10 м от крайнего испарителя. Приборы этой конструкции показали хорошие результаты и в настоящее время их внедряют в практику.

Испаритель П-3. В лаборатории физики почв МГУ по проекту Качинского изготовлен прибор для изучения испарения с полей зерновых сельскохозяйственных культур сплошного посева с междурядьями в 15 см. Прибор по форме напоминает испаритель Рыкачева, а по принципу устройства — испаритель Попова.

Испаритель (рис. 83) состоит из двух металлических ящиков, плотно входящих один в другой. Размеры внутреннего ящика 12×30×40 см, наружного — 12,5×30,5×50 см. Дно (3) внут-

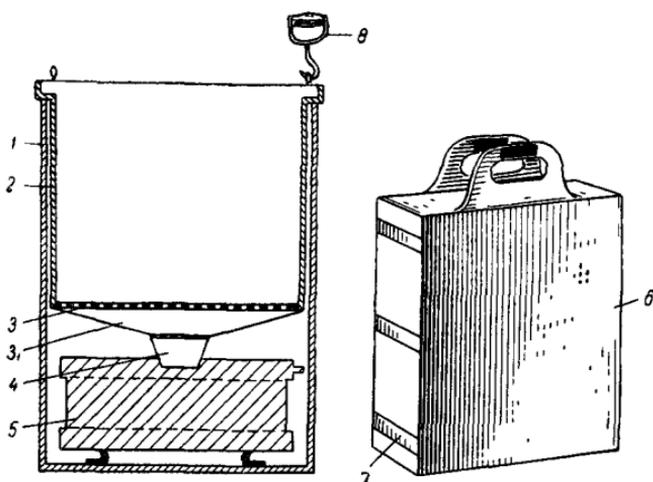


Рис. 83. Испаритель П-3 лаборатории физики почв МГУ:

1 — наружный ящик, 2 — внутренний ящик, 3 — сетчатое дно, 3а — воронкообразная нижняя часть испарителя, 4 — отверстие, 5 — водосбор, 6 — форма, 7 — планка, 8 — ручка

рненного ящика из металлической пластины с круглыми отверстиями 1,5—2—3 мм в диаметре плотно лежит на воронкообразной нижней части испарителя (3), оканчивающейся воронкой в форме усеченной пирамиды (4). В наружный ящик с глубоким дном вставляют водосбор (5). Для взятия почвенного монолита изготовлена специальная форма (6), ширина и длина которой на 2—5 мм меньше соответствующих размеров внутреннего цилиндра. Для облегчения погружения одна из узких сторон не сплошная, а в виде 3 планок (7). Взятый монолит почвы формой (6) аккуратно выжимают в испаритель. На место, откуда взят почвенный монолит, вставляют внешний защитный ящик (1), в который опускают водосборное устройство и затем испаритель с почвенным монолитом. Почвенные монолиты берут вместе с культурой (пшеница, рожь, просо и т. д.), а в междурядьях — без растений. Испарители с растениями устанавливают в рядке

посева, а те, что без растений,— в междурядьях. При взвешивании испаритель вынимают из гнезда с помощью ручек (8).

Испарители гидростатического взвешивания основаны на том, что вес монолита почвы в испарителе уравнивается гидростатическим давлением воды, в которую погружают испаритель, а изменения веса, связанные с испарением или выпадением осадков, фиксируют вертикальным перемещением монолита, что позволяет использовать монолиты больших размеров и производить измерение испарения с точностью до 0,01 мм.

Гидравлический почвенный испаритель по проекту Урываева был построен в 1950 г. Его размеры: площадь сечения 5 м<sup>2</sup>, высота 2 м, вес монолита почвы вместе с металлическим корпусом испарителя 21—25 т (около 14 т весит почва). Монолит держат на кольцевом поплавке (понтоне) в бетонированном бассейне с водой. Подъемная сила поплавка уравнивает вес испарителя с почвой. Имеется устройство для точного отсчета погружения испарителя в бассейн.

Государственный гидрологический институт выпустил испарители малой модели — ГГИ-51 с площадью сечения около 0,2 м<sup>2</sup> и весом почвенного образца 400—500 кг. Определение испарения с помощью гидравлических испарителей просто и точно.

Испарение водонасыщенной почвы при постоянном притоке воды. Величина испарения водонасыщенной почвы стоит в тесной связи с притоком тепла к поверхности почвы. Будыко предлагает измерять ее отношением величины радиационного баланса к скрытой теплоте парообразования.

Для учета испарения из водонасыщенной почвы в полевых условиях употребляют компенсационные испарители Жилинского, Роде, испарители ГГИ и др. Принцип устройства их состоит в том, что испаритель соединяют с сосудом, наполненным водой, уровень которой поддерживают постоянным. По мере испарения убыль воды пополняют из сосуда, расход воды в котором компенсируется автоматически с помощью системы Мариотта, или его периодически доливают. Величину испарения вычисляют по расходу воды в компенсационном сосуде.

Пусть за сутки в сосуд долито 100 мл воды. При площади испарителя 500 см<sup>2</sup> испарение

$$E = \frac{100 \cdot 10}{500} = 2 \text{ мм/сутки.}$$

Компенсационный испаритель ГГИ (рис. 84) дает возможность изучить влияние грунтовых вод на величину испарения. Испаритель (1) площадью сечения 0,3 м<sup>2</sup> и глубиной 2 м погружают в бетонное гнездо, сделанное в почве или грунте. Причем, строят сразу 3—4 испарителя с общей камерой (А). В дно испарителя вмонтирована выводная трубка (4)

С помощью каучуковой трубки испаритель соединяют с цилиндром-компенсатором (3). Цилиндры установлены на подставке штатива, имеющего шкалу на вертикальной стойке. Перемещая цилиндр-компенсатор по вертикали, устанавливают в испарителе заданный уровень воды. В испаритель можно помещать насыпную почву и почвы естественного сложения. После взятия монолита нижнюю часть его выравнивают и к краю цилиндра приваривают дно. Установка дает возможность изменять уровень «грунтовых» вод от 25 до 180 см (от поверхности). Величину испарения определяют по количеству воды, долитой в компенсатор, с учетом слива дождевой воды.

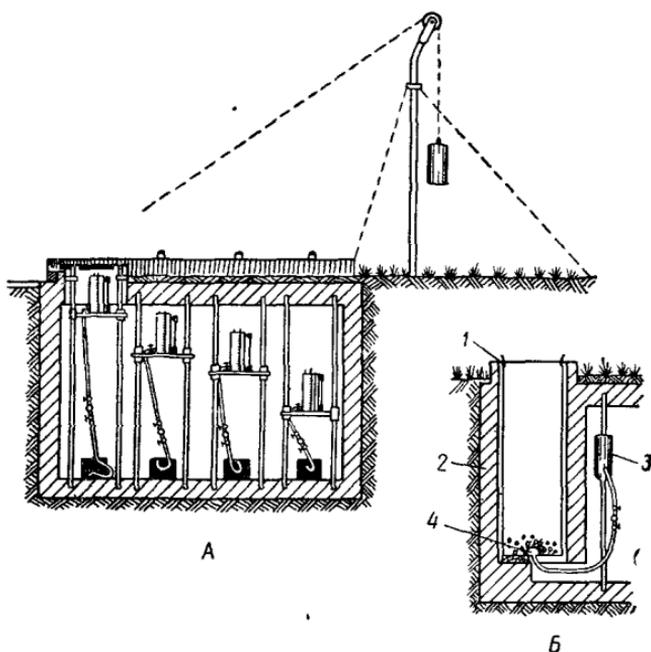


Рис. 84. Компенсационный испаритель ГИ. А — общий вид камеры с компенсаторами, Б — испаритель:  
1 — испаритель с почвой, 2 — бетонное гнездо, 3 — компенсатор, 4 — вход трубки компенсатора в почву

В Средней Азии на опытных полях Института хлопка (совхоз «Пахта-Арал», Бухарское и Федченское опытные поля) установлены испарители-лизиметры площадью  $0,7 \text{ м}^2$  (металлические), глубиной 50 см и больше с постоянным уровнем грунтовых вод. Уровень грунтовых вод поддерживают в них на 1,2 и 3 м, доливая или откачивая воду из лизиметра через контрольную трубку. Расход воды определяют по количеству прилитой воды в лизиметр за сутки.

По данным И. К. Киселевой, за срок 28.VI—28.VII люцерна второго года жизни израсходовала на испарение грунтовой воды при уровне ее 1 м —  $3680 \text{ м}^3$ , 2 м —  $3279 \text{ м}^3$  и 3 м —  $436 \text{ м}^3$ .

На основании лизиметрических данных установлена доля участия грунтовых вод в той же влаге, которая испаряется с поверхности почв, и зависимость ее величины от глубины их залегания. По данным С. Н. Рыжова, при глубине залегания грунтовых вод 1 м оросительная норма хлопка может быть снижена до 3 000—4 000 м<sup>3</sup>; при глубине залегания грунтовых вод на 1—2 м оросительную норму уменьшают до 2 000—2 500 м<sup>3</sup> и т. д. Таким образом, наблюдения над испаряемостью дают весьма важные данные для решения практических задач.

---

## ГЛАВА IX

### ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Основной источник тепла в почве — солнечная радиация. В небольших количествах выделяется теплота некоторыми элементами в земной коре при радиоактивном распаде, в ходе биологических процессов и химических реакций; она выделяется также при смачивании сухой почвы (теплота смачивания). Тепло, идущее из нижних глубоких слоев земли, имеющих высокую температуру, ничтожно и практического значения не имеет. Приток тепла к поверхности земли от солнца и аккумуляция его почвой зависят от географического положения территории, свойств поверхности и верхних горизонтов почвы — ее окраски, механического состава, структуры, содержания влаги и т. д.

Тепловой баланс подстилающей поверхности почв складывается из радиационного притока тепла —  $Q_p$ , теплоотдачи путем турбулентного обмена с атмосферой —  $Q_m$ , потери тепла на испарение влаги из почвы —  $Q_{исп}$ , потока тепла в глубинные горизонты почвы  $Q_n$ . Уравнение теплового баланса:

$$Q_p - (Q_m + Q_{исп} + Q_n) = 0.$$

Приток тепла от солнечной радиации очень важен при характеристике теплового режима почв. В верхних слоях атмосферы солнечная радиация дает  $1,88 \text{ кал/см}^2/\text{мин}$ , однако до поверхности земли доходит значительно меньше тепла. Радиационный баланс поверхности почвы равен разности потоков падающей на землю и отраженной от нее солнечной радиации. Поглощенное поверхностью почвы тепло расходуется на нагрев глубинных горизонтов, испарение влаги из почвы и излучение.

Радиационное тепло измеряют балансомерами разных конструкций. Балансомер состоит из двух горизонтальных зачерненных пластин, одна из которых обращена вверх и воспринимает

падающую на землю радиацию, другая — вниз — отраженную. Поток радиации, попадающий на верхнюю и нижнюю пластину, различен, что обуславливает разность температур пластин и, как следствие этого, преобразование его в термоток, силу которого измеряют гальванометром.

При изучении теплового режима почвы можно использовать термоэлектрический балансомер Янышевского. Балансомер состоит из латунного диска, к которому привинчены две круглые пластины с квадратными окнами в центре. Окна закрыты снаружи зачерненными медными листами-приемниками, к внутренней поверхности которых припаяны термопары из манганина и константана. Величина тока пропорциональна радиационному балансу. Гальванометр градуируется на количество тепла в калориях, полученные показания рассчитывают на  $1 \text{ см}^2/\text{мин}^1$ .

**Альbedo поверхности почвы.** Солнечная радиация (прямая и рассеянная) частично отражается от поверхности почвы. Поток отраженной радиации, выраженный в % от потока первоначальной радиации, достигшей данной поверхности, называют альbedo. Чем выше альbedo, тем меньше нагревается поверхность почвы. Альbedo почвы зависит от ее окраски, шероховатости поверхности, влажности почвы и характера растительного покрова, измеряют его альбедометрами.

Известны альбедометры различных конструкций.

При почвенных исследованиях для быстрых и массовых определений можно использовать походный альбедометр Янышевского.

Значения альbedo (А %) для некоторых поверхностей:

чернозем влажный	— 8
чернозем сухой	— 14
снег	— 80
песок белый	— 40

### ТЕПЛОТА СМАЧИВАНИЯ

При смачивании абсолютно сухой почвы водой выделяется тепло. Теплота смачивания образуется, главным образом, за счет уменьшения кинетической энергии молекул воды, адсорбируемых на поверхности почвенных частиц, и гидратации поглощенных катионов. Величина ее зависит от общей поверхности, минералогического и химического состава почвы и важна для ее физической характеристики. Теплоту смачивания учитывают в практике орошения: полив сельскохозяйственных культур обычно производят рано утром или вечером, когда теплота смачи

<sup>1</sup> Точное описание и использование прибора изложено в книге В. Н. Келерливанского и М. С. Стернзат «Метеорологические приборы», Л., 1953.

бания не может вызвать перегрева растений. Теплоту смачивания определяют с помощью калориметров системы Янерта, Сергеева, Андрианова. В практике наиболее распространен калориметр Андрианова (рис. 85).

### Калориметр

Андрианова состоит из двух металлических цилиндров: внешнего — 1 для почвы и внутреннего — 2 для воды. В центре второго цилиндра помещена металлическая трубка длиннее самого цилиндра в два раза диаметром 1,5 см для термометра Бекмана; по бокам в дне проделаны два отверстия: одно — для мешалки и второе — в виде косо срезанной трубочки, в которое вставляют палочку, плотно закрывающую его. Через это отверстие вытекает вода в почвенный цилиндр. В центре крышки второго цилиндра проделаны отверстия: большое — для

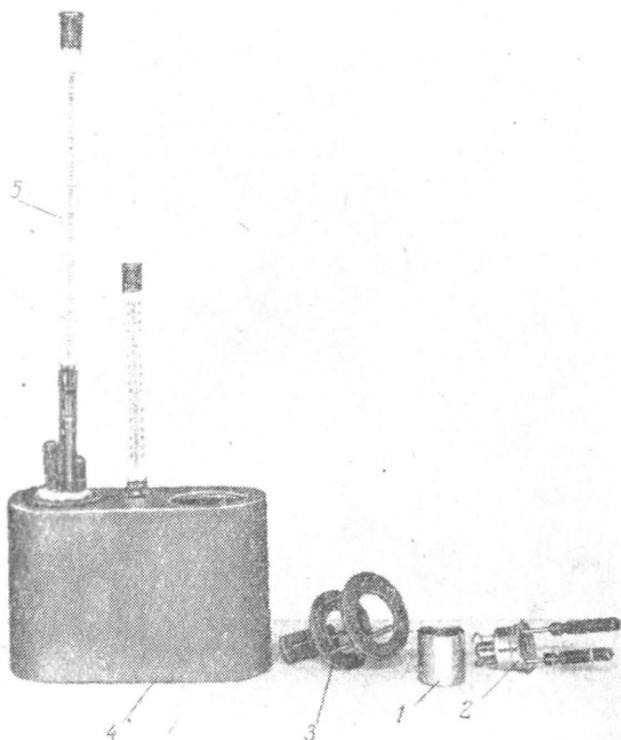


Рис. 85. Калориметр Андрианова:

1 — внешний цилиндр, 2 — внутренний цилиндр, 3 — эбонитовый каркас, 4 — водяной термостат, 5 — термометр Бекмана

термометра Бекмана и на периферии три отверстия диаметром 0,5 см для мешалки, палочки и для вливания воды. Второй цилиндр плотно вставляют в первый. Собранный калориметр со вставленным термометром Бекмана — 5 укрепляют в эбонитовом каркасе — 3 и опускают в водяной термостат — 4, имеющий гнезда для двух калориметров и отверстие для обыкновенного термометра. Выделяющееся при смачивании почвы тепло нагревает калориметр, погруженную в него часть термометра Бекмана — 5, воду и почву, поэтому перед опытом необходимо определить количество тепла, необходимое для нагрева каждого компонента на один градус. Количество тепла, необходимое для нагревания всей калориметрической системы на один градус, называют тепловым значением калориметра или водным эквивалентом.

Теплоемкость калориметра —  $q_1$  равна весу всех металлических частей, умноженному на удельную теплоемкость латуни 0,0917, из которой он сделан. Эбонитовые ручки мешалки и палочки отвинчивают и металлические части калориметра взвешивают на технико-химических весах с точностью до 0,01 г. Если вес их 200 г, то  $q_1 = 200 \cdot 0,0917 = 18,34$  кал.

Определяют теплоемкость погруженной части термометра  $q_2$ . С помощью резинового кольца отмечают глубину погружения термометра Бекмана в калориметр. Затем до этой же метки термометр погружают в мерный цилиндр с водой и определяют объем погруженной части термометра  $V = 7$  мл.

Объемная удельная теплоемкость ртути и иенского стекла равна 0,46 кал, следовательно,  $q_2 = 7 \cdot 0,46 = 3,22$ . Теплоемкость воды —  $q_3$  равна объему прилитой воды — 10 мл  $\cdot 1 = q_3 = 10$  кал (удельная теплоемкость воды = 1).

Теплоемкость почвы в калориметре —  $q_4$  равна весу ее — 10 г  $\cdot 0,18 = q_4 = 1,8$  кал (0,18 средняя удельная весовая теплоемкость почвы).

Общее количество тепла, необходимое для нагрева всей системы на  $1^\circ$ , равно  $Q_k = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = 18,34 + 3,22 + 10,00 + 1,80 = 33,36$  кал.

**Регулировка термометра Бекмана.** Термометр Бекмана имеет два резервуара со ртутью — один в верхней части в виде изогнутой узкой (рис. 86) трубки — 2 и второй внизу — 1. Ожидаемый подъем температуры обычно бывает  $1-2^\circ$ . Шкала термометра рассчитана на  $5^\circ$  с делениями до  $0,01^\circ$ . Через лупу на глаз отсчет делают с точностью до  $0,005^\circ$  С. Перед опытом нужно добиться, чтобы мениск шкалы термометра был не выше 3 и не ниже  $1-0,5^\circ$  с тем, чтобы ожидаемый подъем ртути и последующее понижение не вышли за пределы шкалы. Если мениск стоит низко, то из верхнего резервуара ртуть перегоняют в нижний и наоборот. Для этого ртуть в нижнем резервуаре подогревают рукой до тех пор, пока мениски верхний и нижний не соединятся, после чего резервуар, в который переливают ртуть, опускают вниз. Желательно его слегка охладить. О количестве ртути, перешедшей из одного резервуара в другой, можно судить по шкале верхнего резервуара. Легким постукиванием рукой разрывают ртутный столбик между верхним и нижним резервуарами.



Рис. 86. Термометр Бекмана:

1 — нижний ртутный резервуар,  
2 — верхний ртутный резервуар

**Ход определения.** Из воздушно-сухой почвы, просеянной через сито с отверстиями в 1 мм,

отбирают две пробы, приблизительно по 10 г для суглинистых почв и по 15 — для супесчаных. Почву сушат в течение 10 час, после охлаждения взвешивают с точностью до 0,001 и перено-

сят во внешний — I цилиндр калориметра. В отверстие крышки из бюретки приливают 10 или 15 мл воды, в зависимости от навески почвы. Перед этим отверстие для воды в дне цилиндра плотно закрывают палочкой. Калориметр ставят в каркас и затем в термостат, воду в который наливают за сутки до опыта, в центр его вставляют термометр Бекмана. В одном термостате можно вести два определения сразу. Когда весь прибор собран, дают ему постоять 5—10 мин для выравнивания температуры и затем приступают к опыту. Запись ведут по форме табл. 41.

Таблица 41

Ход температуры в калориметре (по термометру Бекмана)

До опыта		Во время опыта		После опыта	
№ отсчета	Показания термометра	№ отсчета	Показания термометра	№ отсчета	Показания термометра
1	1,09	1	1,08	1	2,29
2	1,08	2	1,25	2	2,28
3	1,08	3	1,58	3	2,26
4	1,07	4	1,95	4	2,25
5	1,06	5	2,25	5	2,23
6	1,05	6	2,30	6	2,21
7	1,05	7	2,30	7	2,19
8	1,04	8	2,29	8	2,18
9	1,03	—	—	9	2,17
10	1,02	—	—	10	2,15

$$a = \frac{1,09 - 1,02}{10} = 0,007 \quad b = \frac{2,29 - 2,15}{10} = 0,014.$$

Во время опыта калориметр теряет часть тепла в окружающее пространство (лучеиспусканием), на что необходимо вводить поправку. Поправку определяют из 10 отсчетов по термометру Бекмана перед опытом и после опыта, которые производят через каждую минуту. Затем вычисляют поправку на лучеиспускание перед опытом —  $a$  и после опыта —  $b$ .

Поправку на лучеиспускание во время опыта —  $c$  берут как среднее:

$$c = \frac{a + b}{2} = \frac{0,007 + 0,014}{2} = 0,0105.$$

Начав опыт, вынимают палочку, вода выливается в цилиндр с почвой, а отверстие вновь закрывают палочкой. Воду и почву перемешивают мешалкой. При смачивании выделяется теплота и температура повышается. Наблюдения за температурой по термометру Бекмана после смачивания продолжают через каждую минуту до тех пор, пока температура начнет снижаться, после

чего делают еще 10 отсчетов через каждую минуту или один отсчет через 10 мин и опыт считают законченным. Длительность опыта ( $n$ ) — 3—15 мин в зависимости от почвы. При вычислении учитывают максимальное показание термометра Бекмана, в нашем случае  $2,30^\circ$ . Температурный скачок  $t^\circ = 2,30 - 1,02 = 1,28^\circ$ . Однако истинное повышение температуры  $t_u$  было более высоким, так как во время опыта система теряла часть тепла на излучение в окружающую среду. Опыт длился  $n = 6$  мин, за это время в калориметрической системе температура понижалась на  $0,0105^\circ$  в минуту или на  $0,0105 \cdot 6 = 0,063^\circ$  в течение опыта. Значит  $t_u = t^\circ + nC = 1,28 + 0,063 = 1,343^\circ$ . До этой температуры после выделения тепла нагревалась вся система. Общее количество выделившегося тепла  $Q = Q_k \cdot t_n$ , где  $Q_k$  — тепловое значение калориметра,  $t_n$  — максимальный температурный скачок после смачивания почвы с поправкой на потерю тепла за счет лучеиспускания.

Теплота смачивания в кал/г почвы

$$q \text{ кал/г} = \frac{Q \cdot t_n}{m} = \frac{33,36 \cdot 1,343}{10} = 4,48 \text{ кал/г}, \quad (96)$$

где  $m$  — навеска почвы.

По теплоте смачивания  $q$  вычисляют величину максимальной гигроскопической  $W_{гг} \% = 2q$ .

## ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ

Основные тепловые свойства почвы — весовая и объемная теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность. Они определяют степень нагревания почвы, скорость и глубину проникновения тепла в нижележащие горизонты.

### Теплоемкость почвы

Количество тепла в калориях, необходимое для нагревания 1 г абсолютно сухой почвы на  $1^\circ$ , называют весовой удельной теплоемкостью —  $C_B$ . Количество тепла, необходимое для нагревания  $1 \text{ см}^3$  сухой почвы на  $1^\circ$  называют объемной удельной теплоемкостью —  $C_v$ . Объемная и весовая теплоемкости связаны между собой уравнением:

$$C_v = C_B \cdot d_1, \quad (97)$$

где  $d_1$  — удельный вес твердой фазы почвы. Следовательно, определив весовую теплоемкость и удельный вес твердой фазы почвы, можно вычислить объемную теплоемкость почвы. Теплоемкость  $C_B$  твердой фазы почвы аддитивна теплоемкости составляющих ее компонентов. По данным сотрудника лаборатории физики почв МГУ Е. А. Дмитриева, теплоемкость твердой прокаленной части почвы в интервале температур  $25-50^\circ$  равна 0,184 для таежных и степных почв, для засоленных — несколько выше. Теплоемкость химически связанной воды, в среднем, равна 0,45, гумуса — 0,30 и углекислоты карбоната — 0,212 кал/г/град при температуре  $25^\circ$ .

На основании этих величин автор предложил эмпирическую формулу для вычисления удельной весовой теплоемкости твердой фазы почв —  $C_B$ .

$$C_B = C_{из} \frac{[100 - (a + b + v)] + (C_{xc} a + C_2 b + C_c v)}{100}, \quad (98)$$

где  $C_{из}$  — удельная теплоемкость минеральной прокаленной части почвы;

$C_{xc}$  — удельная теплоемкость химически связанной воды;

$C_2$  — удельная теплоемкость гумуса;

$C_c$  — удельная теплоемкость углекислоты карбонатов;

$a$  — процент химически связанной и кристаллизационной воды;

$b$  — процент гумуса;

$v$  — процент  $CO_2$  в почве.

Если в почве нет карбонатов или гумуса, то соответствующие члены в расчете опускают.

Расчеты теплоемкости, приведенные автором по данным сокращенного валового анализа твердой фазы, показали хорошую сходность с фактическими данными.

Объемная теплоемкость почвы естественного сложения зависит от теплоемкости твердой фазы почвы, влажности почвы и содержания воздуха в ней. Зная объемную удельную теплоемкость и количественный состав компонентов, легко вычислить объемную теплоемкость естественной почвы. В среднем, удельная объемная теплоемкость твердой фазы почвы равна 0,4, воды — 1, воздуха —  $0,36 \cdot 10^{-3}$  кал/г/град. Если скважность почвы равна 50, объемная влажность 30%, то объем твердой фазы равен  $100 - 50 = 50\%$  и воздуха — 20%. Тогда

$$C_v = \frac{50 \cdot 0,4 + 30 \cdot 1 + 20 \cdot 0,36 \cdot 10^{-3}}{100} = 0,40 \text{ кал/см}^3/\text{град}.$$

Теплоемкость воздуха ничтожно мала и в расчет ее часто не принимают.

**Определение теплоемкости с помощью калориметра.** Принцип калориметрического метода состоит в следующем: навеску сухой почвы  $M$ , имеющую удельную теплоемкость  $C_x$ , нагревают до  $t_2^\circ$ , помещают в калориметр, вес металлических частей которого равен  $M_1$ , а теплоемкость —  $C_1$ , масса воды в калориметре —  $M_2$  при теплоемкости ее  $C_{H_2O}$ , равной 1, и температуре  $t^\circ$ . После внесения почвы в калориметр устанавливают равновесную температуру  $T$ . При этом почва теряет часть тепла, а калориметр и вода приобретают соответствующее количество тепла. Следовательно:

$$MC_x(t_2^\circ - T) = (M_1C_1 + M_2C_{H_2O})(T - t_1).$$

Отсюда теплоемкость почвы

$$C_x \text{ кал/г/град} = \frac{(M_1C_1 + M_2C_{H_2O})(T - t_1)}{(t_2 - T)M}. \quad (99)$$

Описываемый калориметр (рис. 87) состоит из калориметрического латунного стакана цилиндрической формы — I емкостью 700—1500 мл, который вставляют во второй, защитный стакан — 2 с воздушной оболочкой (или без нее) Стакан

закрывают эбонитовой крышкой — 3, в которую вмонтированы приемник для образца почвы — 4, пропеллерная мешалка — 5 для перемешивания в калориметре воды или спирта и термометр Бекмана — 6 для определения ее температуры. Смонтированный калориметр помещают в большой защитный бак — 7 с теплоизоляцией из войлока — 9, заполненный жидкостью — 8, перемешивание которой производят специальной мешалкой — 10 и температуру которой контролируют обыкновенным термометром — 11. Во время определения бюкс с почвой — 12 помещают

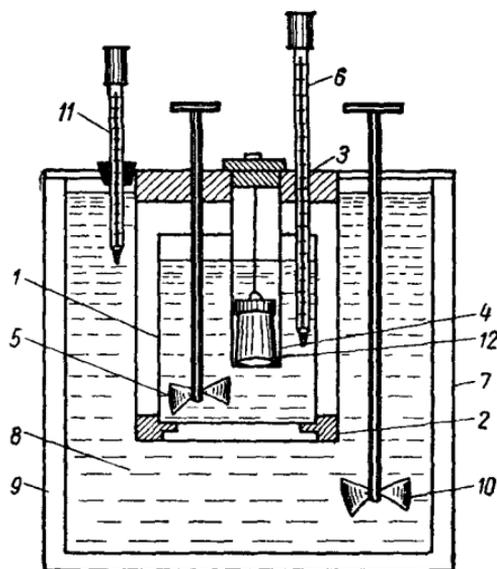


Рис. 87. Схема калориметра для определения теплоемкости:

1 — калориметрический стакан, 2 — защитный стакан, 3 — эбонитовая крышка, 4 — приемник для почвы, 5, 10 — мешалки для перемешивания жидкости в калориметре, 6 — термометр Бекмана 7 — защитный бак, 8 — жидкость в защитном баке, 9 — теплоизоляция из войлока, 11 — обыкновенный термометр, 12 — бюкс с почвой

в приемник из металлической крупной сетки. Кроме того, многие калориметры снабжены обогревателем, используемым для определения теплового значения калориметра и выравнивания температур жидкости в калориметрическом стакане и защитном баке. Для этих же целей в систему вмонтирован ультратермостат со змеевиком охлаждения (обогреватель и охладитель на рисунке не даны). Используют также адиабатический калориметр, в котором теплообмен с окружающей средой сведен до возможного минимума. Калориметр состоит из большого защитного бака емкостью в 45 л, заполненного спиртом, калориметрической системы и электрооборудования.

Калориметрический стакан смонтирован так, как показано на рис. 87. Он плотно входит в латунный цилиндр, на внешней стороне которого намотана спираль для обогрева калориметрического стакана. Между цилиндром и баком размещают батарею термпар, регистрирующих разность температур между ними с помощью зеркального гальванометра.

Внешний большой защитный бак служит для поддержания постоянной температуры, одинаковой с калориметрической системой. Внутри его смонтирован обогреватель, на который подают питание с ЛАТР'а порядка 30 в через реостат, регулирующий напряжение. К системе подключен змеевик охлаждения, расположенный в защитном баке калориметра, через который из расположенного рядом ультратермостата прогоняют спирт,

пониженной, по сравнению с калориметром, температуры. Охладитель автоматически включается через фотореле, когда цепь обогревателя калориметра выключается, и спирт в защитном баке имеет более высокую температуру, чем калориметрическая система. Наоборот, если в защитном баке температура ниже, то автоматически включается обогреватель бака. Таким путем поддерживают постоянство температуры калориметра и окружающего его защитного бака, что исключает потерю тепла калориметрической системой в окружающее пространство.

Навеску почвы в 5—10 г помещают в специальный металлический бюкс, швы крышки которого заклеивают нитрокраской для предотвращения попадания воды в почву. Затем в течение ночи образцы почвы в бюксе выдерживают в ультратермостате, в песке при заданной температуре  $t_2$ , например при  $60^\circ\text{C}$ . Устройство ультратермостата приведено на схеме (рис. 88).

Для работы с мерзлой почвой используют криостаты, заполненные охлаждающей смесью, сохраняющей постоянную отрицательную заданную температуру. Состав и температура различных охлаждающих смесей даны в табл. 10 приложения. Перед опытом проверяют исправность всех соединений калориметра, добиваются стационарного состояния температуры калориметрической жидкости, наблюдая за показаниями термометра Бекмана. Из ультратермостата бюкс с почвой с помощью трубки, сделанной из термоизоляционного материала, переносят в приемник калориметра. Температуру воды в калориметре отсчитывают по термометру Бекмана —  $t_1$ .

По ходу температуры в системе в течение опыта автоматически включается то охладитель, то нагреватель защитного бака. Через 3—5 мин после того, как в калориметрической системе установлен постоянный ход температуры по термометру Бекмана,

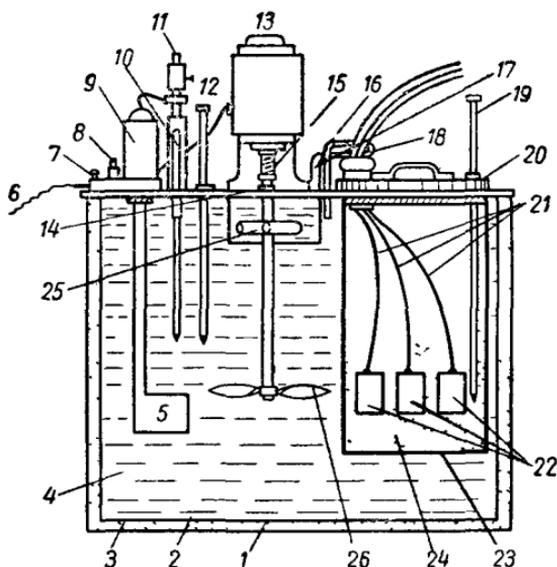


Рис. 88. Схема ультратермостата:

- 1 — оболочка, 2 — изоляция, 3 — стенка сосуда, 4 — спирт, 5 — нагреватель, 6 — провода, 7 — выключатель, 8 — сигнальная лампа, 9 — реле, 10 — контактный термометр, 11 — регулятор термометра, 12 — контрольный термометр, 13 — электромотор, 14 — подставка мотора, 15 — соединительная пружина, 16 — сливная трубка, 17 — нагнетательная трубка, 18 — каучуковая трубка, 19 — контрольный термометр, 20 — крышка, 21 — нитки, удерживающие образцы, 22 — образцы грунта, 23 — внутренний сосуд, 24 — песок, 25 — центробежный насос, 26 — мешалка

делают отсчет —  $T$  и опыт считают законченным. Удельную весовую теплоемкость твердой фазы почвы  $C$  рассчитывают по формуле:

$$C_v = \left[ \frac{K(T - t_1)}{t_2 - T} - W_{\text{БК}} \right] : m,$$

где  $K$  — тепловое значение калориметрического стакана системы, определяемое по теплоте растворения  $\text{KCl}$ ;

$W_{\text{БК}}$  — теплоемкость латунного бюкса с нитрокраской, равная весу бюкса, умноженному на теплоемкость латуни (0,00917) + вес нитрокраски, умноженный на ее теплоемкость (0,5);

$m$  — вес абсолютно сухой навески почвы;

$t_1$  — температура воды в калориметре перед опытом;

$t_2$  — температура почвы перед погружением ее в калориметр,

$T$  — равновесная температура в калориметрической системе в конце опыта.

Адиабатический калориметр позволяет определять удельную теплоемкость почвы в любом интервале температур от 20 до 90°C со средней относительной погрешностью 1—2%. Его широко используют при изучении фазовых изменений воды, льдистости, при определении незамерзающей воды в почвах и грунтах.

**Теплопроводность почвы** — способность ее поглощать и проводить тепло от слоя к слою в направлении, обратном термическому градиенту, т. е. из мест горячих в холодные. Теплопередача в почве складывается из теплопроводности твердой и жидкой фаз почвы, теплопроводности и конвекции тепла через поры, а также излучения его между стенками пор. Количество передающейся через слой почвы тепловой энергии пропорционально градиенту температур и коэффициенту теплопроводности —  $\lambda$ . Коэффициент теплопроводности измеряют количеством тепла в калориях, прошедшего в секунду через сечение почвы в 1 см<sup>2</sup>, при толщине слоя в 1 см и температурном градиенте на концах слоя в 1°. Величина теплопроводности почвы зависит от теплопроводности основных компонентов ее (твердой и жидкой фазы).

Коэффициент теплопроводности твердой фазы почвы колеблется в пределе  $5,8 \cdot 10^{-3}$  —  $0,9 \cdot 10^{-3}$ , для воды же он =  $1,24 \cdot 10^{-3}$ , воздуха —  $0,36 \cdot 10^{-3}$  кал/см сек · град.

Прогревание глубинных горизонтов почвы прямо пропорционально ее теплопроводности и обратно — теплоемкости.

Существует ряд методов определения теплопроводности почв. Наиболее ценны из них те, которые позволяют определить эту характеристику в почве естественного сложения.

Опишем метод шарового зонда постоянной мощности, теоретическое обоснование которого разработал А. Ф. Чудновский. а прибор — Каганов.

**Определение теплопроводности почв шаровым зондом (ШЗ).** Сущность метода состоит в том, что в почву вводят нагреватель в форме металлического шара. Изменение температуры поверхно-

сти шара определяются термическими характеристиками почвы и выражаются формулой

$$T_a = \frac{P}{4\pi_r \lambda} \cdot \frac{1-r}{\sqrt{\pi \cdot \kappa \cdot t}},$$

где  $T_a$  — температура шара;  $P$  — постоянная мощность тока, рассеянная в обмотке шарового зонда;  $r$  — радиус шара;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности почвы;  $\kappa$  — коэффициент температуропроводности почвы;  $t$  — время от начала прогрева до конца опыта

Формулу можно преобразовать:

$$n - n_0 = \frac{bi^2}{\lambda} \left( 1 - \frac{r}{\sqrt{\pi \cdot \kappa \cdot t}} \right),$$

где  $n$  — отклонение гальванометра в момент времени —  $t$ ,  $n_0$  — начальное отклонение гальванометра в делениях шкалы,  $i$  — сила тока в амперах, протекающего по нагревательной обмотке,  $v = 0,06R \cdot C$  — постоянная данного зонда, причем,  $R$  — сопротивление нагревателя в омах,  $C$  — коэффициент пропорциональности между изменением температуры и числом деления гальванометра (деление/градус). Остальные обозначения даны в предыдущей формуле. Если построить график изменения  $n - n_0$  по

$$\frac{1}{\sqrt{t}},$$

нанося  $n - n_0$  по ординате,

$$\frac{1}{\sqrt{t}}$$

по абсциссе, то пересечение прямой с ординатой в точке  $N$  (рис. 91) дает численную величину члена

$$\frac{P}{4\pi_r \lambda}.$$

Выражение

$$\frac{r}{\sqrt{\pi \cdot \kappa \cdot t}}$$

при этом равно нулю. Окончательно теплопроводность почвы вычисляют по формуле

$$\lambda = \frac{vi^2}{N}. \quad (100)$$

Величина  $v$  дана в паспорте прибора.

Главные части прибора — шаровые зонды и измерительное устройство, смонтированное в портативном деревянном ящике.

Шаровой зонд (рис. 89) составлен из двух полушарий (радиусом в 1 см), сделанных из листовой меди толщиной в 0,2 мм. Внутри шара — 1 помещен нагреватель, состоящий из металлического сердечника с намотанной на него манганиновой проволокой. Общее сопротивление нагревателя около 20 ом. К внутренней оболочке шара припаян «горячий» конец термопары; «холодный» конец помещают в почву — 2. Для изоляции от влаги их покрывают слоем краски. Термопары измеряют температуру шара  $T_a$ . Проволоки нагревателя и термопар разветвляются через колодки — 3 и 4. Выводные провода термопар — 5 имеют коричневый цвет,

нагревателя — 6 — желтый. На проводах термопар дана маркировка полярности  $+$  и  $-$ . В комплекте 20 зондов, каждый из которых имеет свой порядковый номер. Измеритель состоит из гальванометра —  $\Gamma$  и миллиамперметра  $mA$ . На панели измерителя расположено 6 клемм: две для аккумуляторной батареи —  $B$ , две для присоединения нагревателя зонда —  $H$  и две для подключения

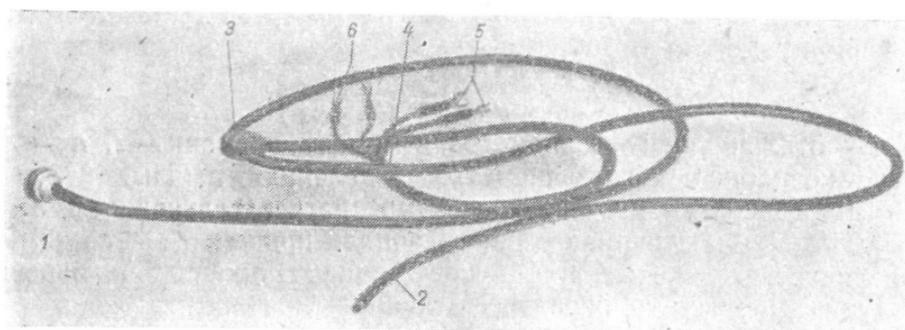


Рис. 89. Шаровой зонд для определения теплопроводности почв: 1 — шар, 2 — холодные концы термопар, 3, 4 — колодки, 5 — выводные провода термопар, 6 — выводные провода нагревателя

термопар —  $T$ , винт для установки стрелки гальванометра на нуль и ключ —  $K$  для переключения пределов измерения миллиамперметра — 300—600  $mA$ . В лицевую вертикальную стенку ящика вмонтирован арретир для включения стрелки гальванометра. Электрическая схема прибора дана на рис. 90. Гальванометр —  $\Gamma$  включен в цепь термопары и определяет температуру зонда, цепь нагревателя зонда —  $H$  включает миллиамперметр —  $mA$ , шунт на два предела измерения 300 и 600  $mA$  —  $\Pi$ , реостат —  $R$ , ключ —  $K$  и батарею —  $B$ , емкостью не менее 10  $a$ /час.

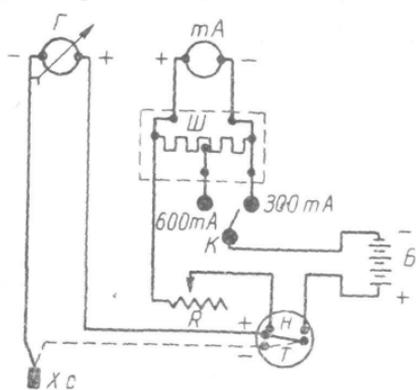


Рис. 90. Схема прибора для измерения теплопроводности почв шаровым зондом:

$\Gamma$  — гальванометр,  $mA$  — миллиамперметр,  $B$  — батарея,  $H$  — нагреватель зонда,  $R$  — реостат,  $K$  — ключ,  $\Pi$  — шунт,  $Xc$  — холодный спай,  $T$  — термопары

**Измерение:** шаровые зонды размещают в почве на желаемой глубине. При этом холодный спай устанавливают на той же глубине, что и зонд, на расстоянии 30 см от него. Необходимо обеспечить хороший контакт датчика и почвы. Недалеко от зонда на поверхности почвы размещают измерительный агрегат. Перед работой необходимо проверить нулевое положение стрелок гальванометра и миллиамперметра, исправляя отклонения с помощью соответствующих корректоров, подключить провода термопар от нагревателя и батареи, соблюдая в последних двух

случаях полярность. Затем отмечают начальное положение стрелки гальванометра —  $n_0$ . Ключ  $K$  следует поставить в рабочее положение на 300 или 600  $mA$ , в зависимости от потребной величины нагревательного тока, и включить секундомер. С помощью реласта  $R$ , имеющего на панели винт, устанавливают определенную силу тока в цепи подогревателя. После включения системы через 15 мин делают отсчет —  $n$ , который повторяют через каждые 5 мин в течение 50 мин. На этом опыт заканчивают.

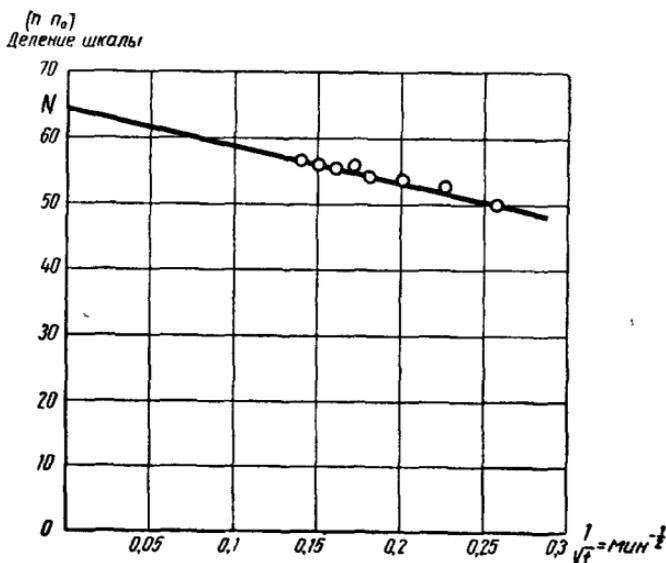


Рис. 91. Градуировочная кривая

На основании полученных данных строят график на миллиметровой бумаге: по оси ординат откладывают показания гальванометра  $n - n_0$ , по оси абсцисс — величину

$$\frac{1}{\sqrt{t}}$$

(рис. 91). Соединив точки прямой, продолжают ее до пересечения с осью ординат, определяя при этом величину  $N$ . Затем по формуле 100 вычисляют теплопроводность. Пусть сила тока = 0,2,  $n_0 = 1$ ,  $v = 1,67$  и  $N = 63,5$   $см/гр$ . Тогда

$$\lambda = \frac{v t^2}{N} = \frac{0,2 \cdot 1,67}{63,5} = 0,00105 = 1,051 \cdot 10^{-3} \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град.}$$

Форма записи при определении теплопроводности приведена в табл. 42.

Этим прибором можно определять —  $\lambda$  и в лаборатории на монолитных образцах соответствующего размера.

Если известны температуропроводность —  $K_t$  и объемная теплоемкость —  $C_v$ , то теплопроводность можно вычислить по формуле:

$$\lambda = K_t \cdot C_v. \quad (101)$$

Форма записи данных опыта по определению теплопроводности

$t$ минут	делен. $n$ шкалы	$n - n_0$	$\frac{1}{\sqrt{t}}$
0	1,0	—	—
15	51,0	50,0	0,258
20	52,8	51,8	0,223
25	53,8	52,8	0,200
30	54,4	53,4	0,182
35	55,5	54,5	0,169
40	56,0	55,0	0,158
45	56,5	55,5	0,149
50	57,0	56,0	0,141

### Температуропроводность почв

Температуропроводность характеризует способность почвы выравнивать свою температуру при наличии разницы степени нагрева в данной и соседней точках. Коэффициент температуропроводности  $K_t$  равен тому повышению температуры, которое произойдет в единице объема почвы при поступлении в нее тепла, численно равному ее теплопроводности —  $\lambda$ :

$$K_t = \frac{\lambda}{C_v},$$

где  $C_v$  — объемная теплоемкость почвы.

При выражении величин в системе СГС

$$K_t — \text{см}^2/\text{сек}$$

Определение температуропроводности почвы в лабораторных условиях можно произвести калориметрическим методом по Кондратьеву, довольно прост и доступен также метод тонкой пластины с мгновенным импульсом тепла Чудновского, пригодный для полевых и лабораторных условий.

Калориметрическое определение температуропроводности почвы  $K_t$  основано на теории регулярного режима охлаждения Кондратьева; при этом определении температурное поле свободно от влияния резких температурных неравномерностей, связанных с первоначальным состоянием системы. При этом коэффициент температуропроводности определяют по формуле  $K_t = K \cdot m$ , где  $K$  — постоянная прибора,  $m$  — коэффициент, зависящий от формы, размера и тепловых характеристик образца почвы.

Для прибора цилиндрической формы

$$K = \frac{1}{\left(\frac{2,4048}{r}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{h}\right)^2},$$

где  $r$  — радиус цилиндра;

$h$  — высота его.

При определении образец почвы, имеющий определенную температуру, помещают в среду с постоянной, но отличной от образца почвы температурой. После установления в системе регулярного режима разность температур образца и среды —  $t^\circ$  будет изменяться по закону

$$t^\circ = Aue^{-mT}, \quad (102)$$

где  $A$  — постоянная,  $u$  — функция координат точки измерения температуры,  $T$  — время,  $m$  — коэффициент, зависящий от формы, размера и тепловых характеристик образца почвы. Измеряя в различные моменты времени  $T_1$  и  $T_2$  и соответствующие им значения разностей температур  $t_1$  и  $t_2$ , согласно формуле имеем  $t_1 = Aue^{-mT_1}$  и  $t_2 = Aue^{-mT_2}$ . Разделив первое на второе и прологарифмировав по основанию  $e$ , получим  $\ln t_1 - \ln t_2 = m(T_1 - T_2)$ . Отсюда

$$m = \frac{\ln t_1 - \ln t_2}{T_2 - T_1}. \quad (103)$$

Если измерить в два различных момента времени  $T_1$  и  $T_2$  соответствующие им разности температуры почвы и воды  $t_1$  и  $t_2$ , можно определить величину  $m$ .

Разность температур образца почвы и жидкости в калориметре пропорциональна термоэлектродвижущей силе, которую измеряют гальванометром. Поэтому в формуле 103  $t_1$  и  $t_2$  можно заменить соответствующими отсчетами гальванометра  $C_n$  и  $C_{n+\kappa}$  (табл. 11 приложений). Тогда

$$m = \frac{\ln C_n - \ln C_{n+\kappa}}{T_2 - T_1}. \quad (104)$$

Калориметр состоит из цилиндра для почвы, термостата и измерителя. Цилиндр (рис. 92) полый, тонкостенный, диаметром 5 см, высотой 7 см, снизу заостренный, чтобы облегчить взятие образца почвы ненарушенного строения. Дно и крышка, сделанные из латуни, закрывают цилиндр. В центре крышки трубочка длиной 10—12 см с диаметром отверстия 2—3 мм, через нее проходят провода термопары, которую помещают в центре образца почвы.

Термостат (рис. 93) — сосуд — 1 цилиндрической формы из меди или оцинкованного железа, внутри которого расположены 3 металлических цилиндра, разделенные воздушными прослойками — а и б. Между стенками первого и второго цилиндра прослойка из войлока — 2 для теплоизоляции. Центральный калориметрический сосуд — 3 емкостью 8 л заполняют водой

и кусками льда, закрывают деревянной крышкой с отверстиями для цилиндра с почвой — 5 и пробирки со ртутью — 6, в которую погружают концы проводов термопары холодного спая калориметра — 7 и контрольной термопары — 8, регистрирующей температуру воды в термостате, которая в течение опыта должна быть постоянной и близкой к  $0^{\circ}$ . Пропеллерная мешалка — 9 энергично перемешивает жидкость. В движение ее приводят с помощью мотора. В качестве измерителей используют гальванометры  $G_1$  и  $G_2$ . Зеркальный гальванометр  $G_1$ , измеряющий электродвижущую силу, возникающую вследствие разницы температур образца почвы и жидкости в термостате, должен быть достаточно чувствительным. Гальванометр  $G_2$  служит для измерения температуры смеси воды-льда. Один конец контрольной термопары опускают в пробирку со ртутью в термостате — 6, другой — в дюаровский сосуд — 10 с тающим льдом при  $t=0^{\circ}$ . В цепь гальванометров включают дополнительное сопротивление. Термопары присоединяют к клеммам панели и через переключатели соединяют с измерителями.

**Измерение:** взятый образец почвы взвешивают вместе с цилиндром, по разности веса

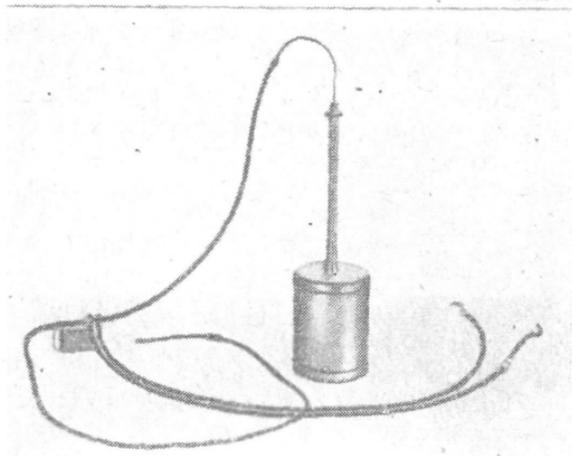


Рис. 92. Цилиндр для определения температуропроводности почвы

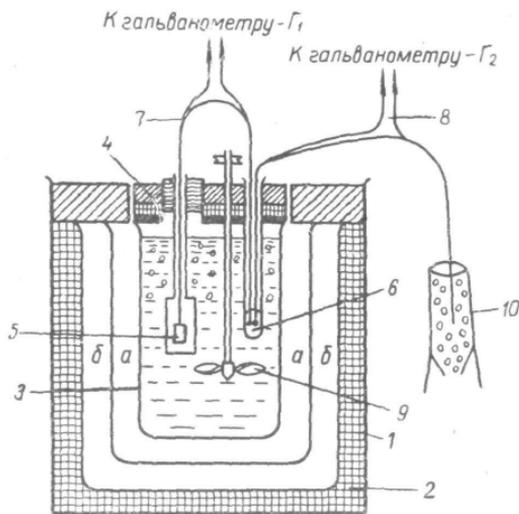


Рис. 93. Схема термостата для температуры охладителя, близкой  $0^{\circ}$ :

1 — сосуд цилиндрической формы, 2 — войлок (а и б — воздушные прослойки), 3 — центральный калориметрический сосуд, 4 — деревянная крышка, 5 — цилиндр с почвой, 6 — пробирка со ртутью, 7 — термопары холодного спая калориметра, 8 — контрольная термопара, 9 — пропеллерная мешалка,  $G_1$  — провода к зеркальному гальванометру,  $G_2$  — провода к стрелочному гальванометру, 10 — дюаровский сосуд

цилиндра с почвой и без нее определяют вес образца почвы. Зная объем цилиндра и влажность почвы, определяют удельный вес скелета почвы. Затем вводят внутрь почвы термопару. Швы дна и крышки цилиндра покрывают нитрокраской для герметичности. При определении температуропроводности мерзлой почвы цилиндр с почвой предварительно выдерживают в ультратермостате или криостате при заданной температуре. Начальная разница температуры почвы и воды со льдом в термостате должна быть не менее 20°. Перед опытом проверяют исправность всей аппаратуры, определяют исходную температуру образца почвы, подключая термопары к гальванометру. Второй холодный конец термопары помещают в пробирку б. Если световой зайчик выйдет за пределы шкалы, то в цепь включают дополнительное сопротивление, с которым предварительно была проградуирована термопара. Если при этом отклонение стрелки гальванометра = + 150 дел., а переводный коэффициент деления гальванометра на температуру = 0,120, то начальная температура образца почвы = 150 · 0,120 = 18°. После установления стабильной температуры в термостате, о чем можно судить по нулевому показанию гальванометра  $T_2$ , опускают калориметр с почвой в охлаждающую смесь, включают секундомер и делают отсчеты вначале через каждые 2 или 5 делений шкалы гальванометра в зависимости от скорости перемещения зайчика, а затем, когда установлен тепловой режим в калориметре, отсчеты производят через 10 или 20 делений шкалы. Если между калориметром и калориметрической жидкостью в термостате большая разность температур и световой зайчик выходит за пределы шкалы, то следует ждать момента появления зайчика на шкале, когда почва достаточно охладится и установится регулярный режим охлаждения. Форма записи при определении температуропроводности приведена в табл. 43.

Вычисление производят по формуле

$$m = \frac{\ln C_n - \ln C_{n+k}}{T_2 - T_1}.$$

Пример: отсчет по стрелке гальванометра  $C_n = 112$  делениям, время  $T_1$ , измеренное по секундомеру, = 124", отсчет  $C_{n+k} = 112$  делениям,  $T_2 = 140''$

$$m = \frac{\ln 122 - \ln 122}{140 - 124} = \frac{0,086}{16} = 0,0053.$$

Среднее значение  $m$  при регулярном режиме (отсчеты 3—7) берут как среднее арифметическое из всех отсчетов или вычисляют по формуле:

$$m = \frac{2,3 (\lg 102 - \lg 62)}{238 - 157} = \frac{0,497}{81} = 0,0061,$$

(цифра 2,3 — коэффициент перехода от десятичных логарифмов к натуральным). Пусть  $K$  прибора = 0,888. Тогда температуропроводность  $K_t = mK = = 0,888 \cdot 0,0061 = 0,0055 \text{ см}^2/\text{сек}.$

Форма записи при определении температуропроводности

№ отсчетов	$T$ сек	Отклон стрелки гальванометра $C_n$	$\ln C_n - \ln C_{n+k}$	$T_2 - T_1$	$m$
1	124	122	0,086	16	0,0053
2	140	112	0,094	17	0,0056
3	157	102	0,103	17	0,0060
4	174	92	0,115	19	0,0060
5	193	82	0,130	22	0,0059
6	215	72	0,150	23	0,0065
7	238	62	0,176	28	0,0062

Для облегчения вычисления составляют таблицу значений  $C_n$  и  $\ln C_n - \ln C_{n+k}$  (см. приложение, табл. 11 и 12).

Метод тонкой пластины Чудновского. Металлическую пластину — 2 из латуни или меди, размером  $15 \times 10$  см, толщиной 1—2 мм нагревают до  $50-60^\circ$  и погружают в почву. По линии центра пластины на расстоянии  $x = 2-3$  см от нее устанавливают ртутный термометр — 3. Выбирают термометр с возможно меньшим размером шарика и ведут наблюдения за ходом температуры. С течением времени температура в точке, отстоящей от центра пластины на расстоянии  $x$  см, повышается, достигает максимума, некоторое время держится на этом уровне и затем опускается.

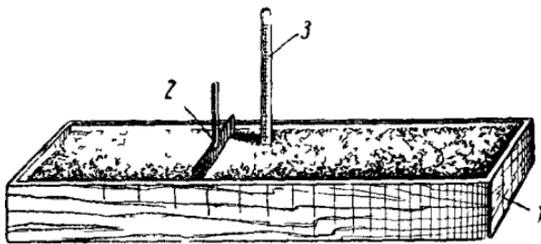


Рис 94. Установка Чудновского для определения температуропроводности.

1 — ящик с почвой, 2 — металлическая пластинка, 3 — термометр ртутный

Для лабораторных измерений изготовляют специальный почвенный ящик — 1, длина его 25, ширина 16, глубина 15 см (рис. 94). Температуропроводность почвы —  $K_t$  вычисляют по формуле

$$K_t = \frac{x^2}{2T_{\max}}, \quad (105)$$

где  $x$  — расстояние термометра от пластины (2—3 см),  $T_{\max}$  — время наступления максимальной температуры в исследуемой точке плюс половина интервала времени, в течение которого держится максимальная температура. В записях наблюдений (табл. 44) отмечают почвы, время  $T$  и отсчеты по термометру  $t^{\circ}\text{C}$ . *Пример вычисления:* пусть расстояние термометра от пластины  $x = 2$  см. Время погружения пластины в почву — начало опыта — 10 час 10 мин. Затем через каждую минуту берут отсчет по термометру.

Таблица 44

Форма записи наблюдений при определении теплопроводности почвы

Почва, глубина взятия образца в см	T в мин									
	время начала опыта 10 час 10 мин	11	12	13	14	25	26	27	28	29
Чернозем обыкновенный, гор А (0—10) см	Температура $t^{\circ}\text{C}$	20,0	20,5	21,5	22,8	23,0	23,0	23,0	22,9	22,9

Из этих данных вычисляют  $T_{\max}$ . Максимальная температура  $23^{\circ}$  наступила через 15 мин и держалась на этом уровне в течение 3 мин:

$$T_{\max} = 15 + \frac{3}{2} = 16,5 \text{ мин.}$$

При  $x = 2$  см,

$$K_t = \frac{2^2}{2 \cdot 16,5} = \frac{4 \text{ см}^2}{33 \times 60} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{сек.}$$

### Температура почвы

Температуру почвы измеряют ртутными термометрами, которые выпускают с приложением поправок в отдельных интервалах температур.

В последнее время все шире в почвенную практику входят электрические термометры — термопары и термометры сопротивления, которые изготовляют и градуируют сами.

**Термопары.** Устройство термопар основано на том, что в месте соприкосновения двух различных металлов, погруженных в почву, возникает электродвижущая сила, являющаяся функцией температуры среды. Термопары (термоэлементы) могут быть получены спаиванием двух проволок из разных металлов. Применяют следующие комбинации металлов при изготовлении термопар:

- |                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| 1. Платина-платинородий | от 0 до 1450° С  |
| 2. Медь-константан      | от 200 до 350° С |
| 3. Железо-константан    | от 200 до 750° С |
| и др.                   |                  |

Изготавливают два спая, от каждого из которых идут концы к измерительному прибору. Термоэлектродвижущая сила  $E_t$ , возникающая при замыкании цепи, пропорциональна разности температур спаев  $t_1$  и  $t_2$  и коэффициенту  $K$ , зависящему от свойств использованных металлов.

$$E_t = K(t_1 - t_2). \quad (106)$$

Для измерения  $E_t$  используют стрелочные гальванометры чувствительностью  $1 \cdot 10^{-6}$  около 1 мА на одно деление шкалы. Это гальванометры марки С-I и С-II, а при точных измерениях используют зеркальные гальванометры, чувствительность которых около  $1 \cdot 10^{-9}$  а. В почвенной практике используют обычно медно-константановую термопару.

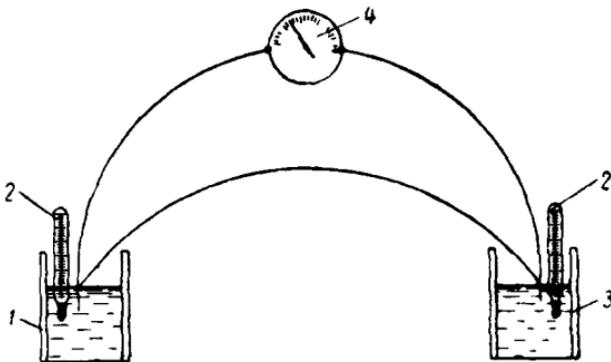


Рис. 95. Установка для градуировки термопар:  
1 — дюаровский сосуд, 2 — термометры, 3 — сосуд для горячего конца термопар, 4 — гальванометр

Градуировку термопар производят на специальной установке (рис. 95). Один из спаев погружают в дюаровский сосуд — 1 с тающим льдом, температуру которого поддерживают постоянной ( $= 0^\circ$ ) и контролируют термометром — 2; второй спай погружают в сосуд — 3, в котором последовательно повышают температуру кипящей воды, измеряя ее термометром — 2. Концы медного провода термопары присоединяют к гальванометру, константановый провод соединяет горячий и холодный спай. Термоэлектрический ток измеряют зеркальным гальванометром (4). Форма записи дана в табл. 45.

Перед градуировкой опускают арретир гальванометра и устанавливают стрелку прибора в нулевом положении. Наполняют оба сосуда тающим льдом, присоединяют термопары к гальвано-

метру (показание гальванометра при этом должно быть равно нулю). Затем добавляют горячую воду в сосуд — 3, повышая каждый раз температуру на 5°, и ведут отсчеты по гальванометру. Температуру сохраняют на одном уровне в период отсчетов. Каждый раз после добавления горячей воды следует производить перемешивание воды в сосуде — 3 мешалкой. По окончании опыта вычерчивают градуированную кривую зависимости показаний гальванометра от температуры, откладывая отсчеты гальванометра по оси абсцисс, а температуру — по оси ординат.

Таблица 45

Форма записи при градуировке термометров

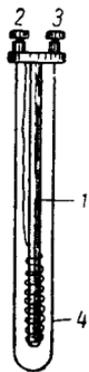
№ пп	Нулевой спай	Рабочий спай	Разница температуры спаев	Число де- лен. откло- нения галь- ванометра	Цена одного деления галь- ванометра
	Отсчеты по термометру				
	$t_1^0$	$t_2^0$			
1	0	4,8	4,8	11,3	0,4248
	0	4,8	4,8	11,3	0,4248
	0	4,8	4,8	11,3	0,4248
	Среднее	—	4,8	11,3	0,4248
2	0	9,2	9,2	21,6	0,4259
	0	9,2	9,2	21,6	0,4240
	0	9,2	9,2	21,6	0,4253
	Среднее	—	9,2	21,6	0,4251
3	0	15,40	15,40	36,2	0,4265
	0	15,35	15,35	36,1	0,4254
	0	15,40	15,40	36,2	0,4254
	Среднее	15,38	15,38	36,17	0,4258

Термометры сопротивления. Электрическое сопротивление чистые металлы и сплавы изменяют почти линейно в зависимости от температуры

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (107)$$

$R_t$  — сопротивление металла при температуре  $t$ ,  $R_0$  — сопротивление металла при  $0^\circ$ ,  $\alpha$  — постоянная величина для платины равна  $3,94 \cdot 10^{-3}$ . Термометры сопротивления готовят из платиновой проволоки ввиду химической стойкости этого металла в интервалах температур от 20 до  $1000^\circ$ , для более узких температурных интервалов используют проволоку из меди, никеля и других металлов.

Термометр (рис. 97) состоит из стержня — 1 (из слюды, фарфора, эбонита или другого изоляционного материала), на который намотана платиновая проволока диаметром 0,05 или 0,1 мм, длиной 1 м. Концы проволоки припаивают к клеммам — 2 и — 3. Цилиндр вставляют в защитную металлическую трубку — 4, нижний конец которой запаян, а верхний закрыт эбонитовой пластинкой с укрепленными на ней клеммами.



В Физико-агрономическом институте для изготовления термометров сопротивления использованы полупроводники (окиси некоторых металлов) и др. Полупроводники обладают большим температурным коэффициентом, который достигает нескольких процентов на градус. Причем при повышении температуры сопротивление полупроводников уменьшается.

Термометры сопротивления с полупроводниками позволяют организовать дистанционные централизованные измерения во многих пунктах, так как, благодаря значительному омическому сопротивлению термометров, можно пренебречь сопротивлением проводящих проводов, переходными контактными сопротивлениями и контактными электродвижущими силами.

Рис. 96. Термометр сопротивления:  
1 — стержень, 2, 3 — клеммы, 4 — защитная трубка

В качестве измерителя в термометрах сопротивления использована схема мостика Уитстона. Неизвестным сопротивлением  $R_x$  из четырех плечей мостика считают сопротивление термометра  $R_t$ . Для градуировки определяют сопротивление термометра  $R_t$  при разных температурах, помещая его в дюаровский сосуд, где с помощью охлаждающих смесей создают определенные отрицательные температуры, а нагревом воды — положительные. Градуируют термометр в пределе ожидаемых величин температуры почвы. При градуировке используют зеркальный гальванометр, но чтобы его не испортить действием сильного тока, вначале включают менее чувствительный стрелочный гальванометр. Вычисляют изменение сопротивления  $\Delta R$  на  $1^\circ\text{C}$  и строят график зависимости сопротивления от температуры. Если платиновая проволока снабжена паспортом и дан ее коэффициент изменения сопротивления в зависимости от температуры  $\alpha$ , то, определив электросопротивление при  $0^\circ$ , можно вычислить величину  $R$  для любого интервала температур по формуле 107.

Измерение температуры поверхности почвы представляет большие технические трудности вследствие того, что термометры имеют обычно трехмерное измерение, а поверхность почвы (плоскость) — двухмерное, поэтому измеряют чаще температуру не самой поверхности, а наиболее деятельного верхнего слоя почвы толщиной в 2—3 мм.

Измерение температуры поверхности почвы представляет большие технические трудности вследствие того, что термометры имеют обычно трехмерное измерение, а поверхность почвы (плоскость) — двухмерное, поэтому измеряют чаще температуру не самой поверхности, а наиболее деятельного верхнего слоя почвы толщиной в 2—3 мм.

Общераспространенный способ — измерение температуры поверхностного слоя почвы ртутными термометрами. При этом используют три термометра: срочный, минимальный и максимальный. Двумя последними измеряют максимальную и минимальную температуру, срочный термометр служит для измерения температуры в срок наблюдения. Резервуар каждого термометра наполовину погружают в почву, половина остается на

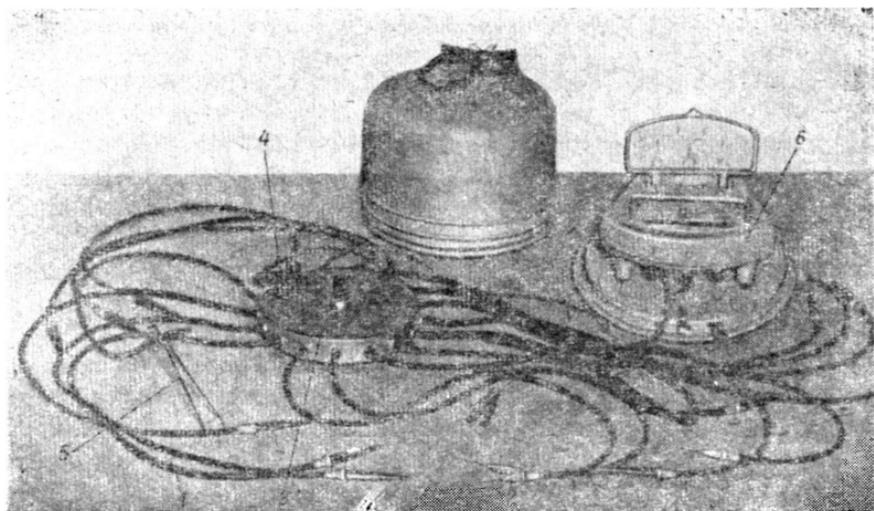


Рис. 97. «Термопаук»:

1 — термопары, 2 — горячие спай, 3 — алюминиевая коробка, 4 — клеммы, 5 — шпилька, 6 — измерительный узел

воздухе. Для наблюдений за температурой почвы выделяют опытную площадку, где и устанавливают термометры. В зависимости от цели исследования растительный покров удаляют или оставляют без изменения. Такой метод измерения температуры поверхности почвы дает существенные погрешности. Более точными оказались электрические термометры.

Электрический термометр — «термопаук» для измерения температуры поверхности почвы разработан в тепловой лаборатории Агрофизического института (АФИ) А. Ф. Чудновским и его сотрудниками. Прибор прост, портативен и достаточно точен.

Термопаук (рис. 97) имеет 16 медно-константановых термопар — 1, последовательно соединенных между собою и образующих одну термобатарею. «Горячие» спай оголены — 2 на 2—3 мм, затем выше на каждый из них надет эбонитовый кожух (1—2 см), на конец которого натягивают резиновые трубки длиной около метра.

Холодные спай термопар собраны в общий агрегат на массивном алюминиевом диске и размещены внутри алюминиевой

коробки — 3 в высверленных канальцах диска и электрически изолированы от его корпуса. Благодаря хорошей теплопроводности алюминия, температура коробки и термопар одинакова. На крышке коробки установлена эбонитовая планка с клеммами — 4 для подключения к измерителю. Коробку с холодными спаями при измерении устанавливают на деревянную подставку, горячие спаяи размещают примерно на 1 м<sup>2</sup> поверхности почвы. Термоспай приводят в контакт с поверхностью почвы и прикрепляют к почве с помощью специальной стальной пружинки-шпильки — 5.

Измерительный узел — 6 состоит из гальванометра, моста Уитстона, в одно из плеч которого включено термосопротивление, имеющее температуру холодных спаев, и зажимов для подключения горячих спаев. Отклонение стрелки гальванометра пропорционально разности температур горячих и холодных спаев термопар. В практике эта разность может быть положительной и отрицательной, поэтому в цепь гальванометра присоединяют переключатель полярности. Шкала гальванометра дает или непосредственно температуру, или строят градуировочную кривую. После установки прибора, в частности, размещения горячих спаев на поверхности почвы, через 10 — 15 мин производят отсчет по гальванометру, который переводят на показания температуры. Окончательная температура представляет собою среднюю величину из 16 определений.

Прибор легко перенести и установить на новом месте, что дает возможность пользоваться им не только при стационарных определениях, но и при разовых эпизодических измерениях температуры почвы.

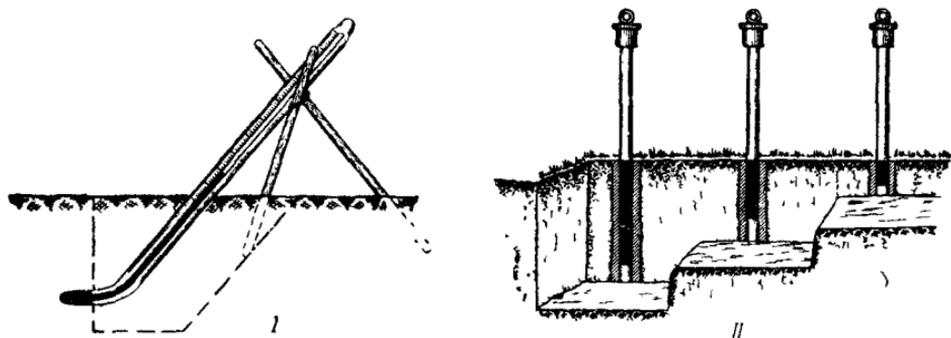


Рис 98 Почвенные термометры:

*I* — коленчатый термометр Савинова, *II* — установка вытяжных ртутных термометров

Почвенные коленчатые термометры Савинова (рис. 98, *I*) применяют для измерения температуры пахотного слоя по глубинам 5, 10, 15 и 20 см. Для более глубоких слоев применяют ртутные вытяжные термометры или электро-термометры.

Термометры Савинова устанавливают на той же площадке, где измеряют температуру поверхности почвы. Для установки выкапывают яму глубиной 30 см с отвесной лицевой стороной, обращенной на север, и вставляют термометры под каждый пятисантиметровый слой так, чтобы резервуар термометра располагался параллельно поверхности почвы, а длинный ствол термометра со шкалой выступал из земли. Термометры ставят на лицевой стенке шурфа по прямой, ориентированной с востока на запад на расстоянии 10 см друг от друга. Когда термометры вставлены, яму засыпают, последовательно уплотняя почву вокруг них.

Для устойчивости под ствол термометра ставят козлы, сделанные из тонких палочек. Термометрами Савинова пользуются в течение вегетационного периода. На зиму их обычно снимают.

Вытяжные ртутные термометры (рис. 98, II) имеют шкалу, градуированную до  $0,2^{\circ}$ ; они вставлены в металлическую оправу, имеющую прорезь против шкалы термометра. При помощи винта оправу с термометром закрепляют на деревянной планке, оканчивающейся металлическим колпаком с кольцом для выемки термометра из почвы. Длину планки устанавливают в зависимости от глубины измерения температуры с таким расчетом, чтобы, после установки термометра на необходимой глубине, верхняя часть его возвышалась над почвой на 30—50 см (в зависимости от глубины снежного покрова в данном месте). На дно оправы насыпают медные опилки, в которые устанавливают резервуар термометра. Опилки сохраняют в течение 30—40 сек прежнюю температуру на шкале, что вполне достаточно для произведения отсчета. Планку с укрепленным термометром вставляют в трубу из пластмассы или эбонита, имеющую на конце металлическую насадку-гильзу, при этом термометр должен касаться дна гильзы. Вся тяжесть термометра при этом приходится на верхний колпачок с кольцом. Перед установкой погружаемую в почву часть трубы окрашивают в зеленый цвет, надпочвенную — в белый, для уменьшения нагревания солнцем.

Вытяжные термометры устанавливают в ряд на расстоянии 50 см один от другого на глубинах 20, 40, 60, 80, 120, 160, 240, 320 см. Глубину погружения термометров увеличивают в направлении к западной стенке почвенного шурфа, глубины можно изменять при различных исследованиях. Для установления трубы на заданной глубине делают скважину буром с диаметром, несколько превышающим диаметр трубки термометра, или выкапывают траншею. После установки трубы скважину засыпают, уплотняя почву вокруг термометра.

Во избежание затоптывания и чрезмерного уплотнения почвы около термометров, вдоль линии установки их строят речный

мост, с которого с помощью крючка вытягивают за кольцо нужный термометр и производят отсчет.

Точечный дистанционный электротермометр ПТТ сконструирован в Агрофизическом институте. Прибор (рис. 99) состоит из 20 штук точечных полупроводниковых термометров сопротивления, измерительного агрегата, распределителя и альбома градуировочных кривых термометров.

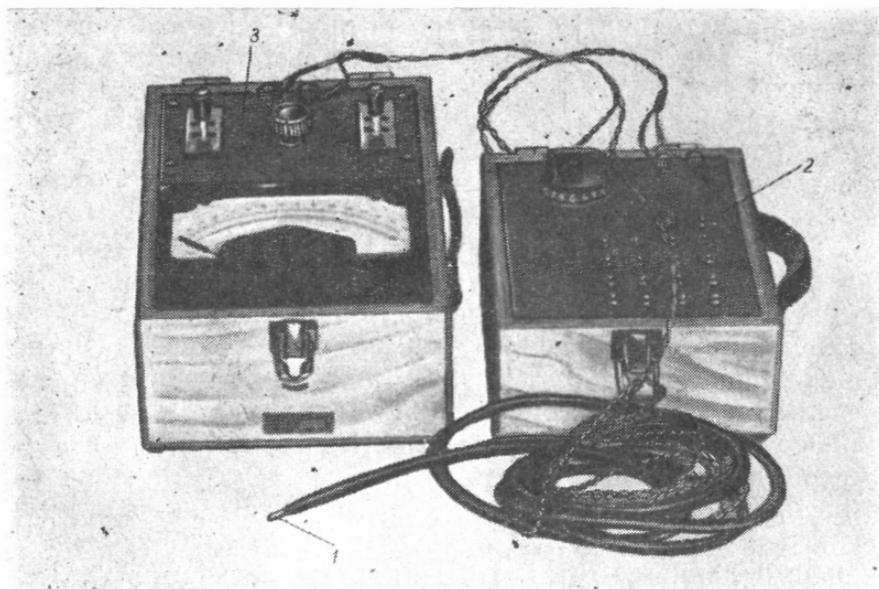


Рис. 99. Точечный дистанционный термометр сопротивления ПТТ:  
1 — точечный термометр, 2 — гнезда распределителя, 3 — измеритель

Точечный термометр имеет обнаженный конец — 1 длиной 5—6 мм, который смонтирован на конце резиновой трубки и представляет собою термосопротивление с высоким температурным коэффициентом (около 3% на 1°C) и внутренним сопротивлением (3000—4000 ом), что дает возможность использовать его для дистанционных измерений температуры. Конец провода термосопротивления подведен к вилке, которую включают в соответствующее ей гнездо распределителя — 2. Точность измерения до 0,2°C, предел измеряемой температуры — от — 20 до + 40°.

Измеритель — 3 имеет в основе схему неравновесного моста Уитстона (рис. 100) с тремя постоянными сопротивлениями —  $R_1, R_2, R_3$ , контрольным сопротивлением  $R_4$  и измеряемым термосопротивлением  $R_x$ , образующим плечи моста, в диагональ которого включен гальванометр. В качестве источника питания используют батарею постоянного тока на 4,5 в. Для поддержания постоянного напряжения, подаваемого к мосту, в цепь дели-

теля напряжения  $R_5$  и  $R_6$  включен реостат с  $R=25000 \text{ }\Omega$ . Регулирование напряжения производят ключом «П-К», включающим в плечо постоянное сопротивление  $R_4$ , подобранное так, чтобы при его включении стрелка гальванометра моста отклонялась на всю шкалу. Если этого нет, то, меняя переменное сопротивление  $R$  в цепи делителя, добиваются того, чтобы стрелка гальванометра при включении стояла на 150 делений. Ключом  $B$  включают питание, к клеммам измерителя подключают распределительное устройство, имеющее гнезда для присоединения к мосту точечных термометров с помощью вилки, находящейся на их концах.

*Установка термометра:* в почве буром проделывают скважину на изучаемую глубину и в дно ее вставляют электротермометр. При засыпке скважины почву тщательно уплотняют. Измерительный агрегат размещают на поверхности почвы на расстоянии длины соединительных проводов. Предварительно каждый точечный термометр градуи-

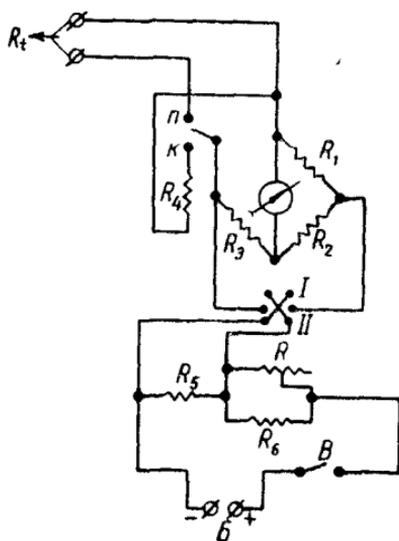


Рис. 100. Схема измерительного устройства

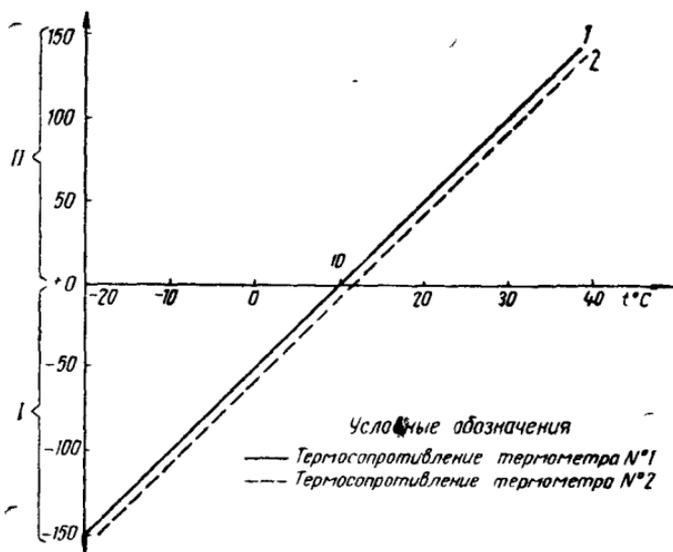


Рис. 101. Градуировочная кривая термометра сопротивления

руют. По оси абсцисс откладывают температуру от  $-20$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , по ординате вверх от абсциссы — показания гальванометра при II положении переключателя, вниз от абсциссы — при I его положении. Температура почвы отсчитывается на прямой (рис. 101) по данным отсчета на гальванометре.

**Измерение глубины промерзания почвы.** При решении ряда теоретических и практических вопросов — культуры сельскохозяйственных растений, оценки почвы и грунта в строительстве — очень важно знать глубину промерзания почвы и грунта. Трудность определения ее состоит в том, что замерзает вода в почве начинает не при нуле, как свойственно обычной воде, а при более низких температурах. Часто имеет место переохлаждение в системе почва-вода и, несмотря на отрицательные температуры, вода содержится в жидком состоянии.

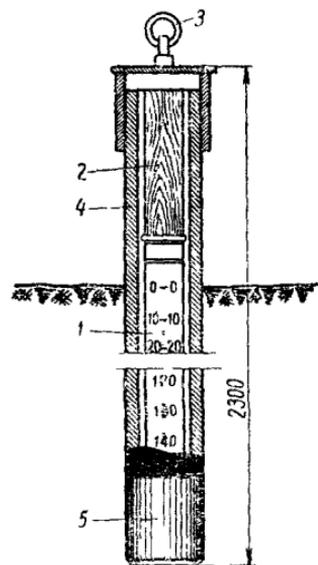


Рис. 102. Мерзлотомер Данилина:

1 — каучуковая трубка, 2 — вытяжная деревянная палка, 3 — кольцо, 4 — защитная металлическая труба, 5 — латунный наконечник

Определение глубины промерзания почвы производят методом шурфования, бурения и мерзлотометрами разных конструкций.

Метод шурфов довольно примитивен и трудоемок, но доступен каждому исследователю. В почве выкапывают яму  $80 \times 60$  см с отвесной лицевой стенкой до глубины промерзания. Границу промерзания определяют по твердости: мерзлая почва значительно тверже, или на глаз: в мерзлой почве простым глазом и через лупу хорошо видны льдинки.

Буровой метод предполагает использование буров, лучше бура Качинского (см. рис. 50 А). Бур с большим трудом вгоняют в мерзлый слой почвы, в талую почву он входит сравнительно легко. В извлеченных буром почвенных образцах естественного сложения наличие льда определяют на глаз с помощью лупы.

Мерзлотомер Данилина (рис. 102) определяет глубину промерзания почвы по замерзанию дистиллированной воды в каучуковой трубке (1), погруженной в почву. Трубку внизу закрывают пробкой, а верхний конец надевают на ниппель деревянной вытяжной палкой (2), на конец которой крепят колпачок с кольцом (3) для выемки мерзлотомера из почвы.

На резиновую трубку нанесена шкала в см. Чтобы лед не перемещался по трубке, внутри нее пропущен пучок воощенных ниток, проходящих через всю длину. Лед, смерзшийся с нитками, остается на месте своего образования. При заполнении трубки

водой через отверстие в ниппеле необходимо следить, чтобы в нее не попал воздух. Резиновую трубку помещают в защитную металлическую трубку (4) с латунным наконечником (5), к которому близко подходит конец измерительной резиновой трубки, так что зазор между ними равен примерно 3 мм. Установку мерзлотомера производят так же, как и вытяжных термометров.

В правильно установленном мерзлотомере нулевое деление шкалы совпадает с поверхностью почвы. Устанавливают мерзлотомер там же, где ведут наблюдения за температурой почвы.

Длина мерзлотомера в почве составляет 150—200 см, что соответствует наблюдаемой в природе глубине промерзания почв. При отсчете наблюдатель, стоя на скамейке, вытаскивает за кольцо резиновую трубку, прощупывает ее, устанавливает длину столбика замерзшей воды и глубину ее нахождения, затем опять опускает трубку в защитную трубу. Наблюдения по мерзлотомеру ведут с осени до весны, до полного оттаивания почвы.

Описанный мерзлотомер прост, доступен и широко распространен, но измеряет он не глубину промерзания почвы и грунта, а проникновение в почву нулевой температуры. Замерзание дистиллированной воды происходит при другой температуре, чем замерзание воды в почве. Для более точных измерений следует использовать метод электрического сопротивления. На этом принципе сконструирован ряд мерзлотометров: Зильбер — Боженовой, Рымши, Боженовой, Шимановским. Из них мерзлотометр Шимановского (ТЭМ) более совершенный, позволяющий одновременно регистрировать глубину промерзания или оттаивания почвы и ее температуру. Перечисленные выше мерзлотометры измеряют только промерзание почвы.

**Определение замерзающей и незамерзающей воды с помощью калориметра.** Метод разработан в центральной лаборатории института мерзлотоведения АН СССР (З. А. Нерсесова, 1954). В основе его лежит определение количества тепла, расходуемого на таяние льда в замерзшей почве. Измерение производят в калориметре, устройство которого дано на рис. 93.

*Ход определения.* Производят сборку и проверку работы калориметра, калориметрический стакан наполняют водой, вес которой устанавливают путем взвешивания. Температура воды в калориметре 17—20°. Затем определяют тепловое значение калориметра  $K$  по теплоте растворения перекристаллизованного  $KCl$ . Теплота растворения 1 моль  $KCl = 4\,194$  кал при 25°C. Навеску  $KCl = g$  растворяют в воде калориметра. При растворении  $KCl$  выделяется теплота  $Q_1 = 4\,194 \cdot \frac{g}{74,5}$ , где 74,5 — молекулярный вес  $KCl$ .

Тепло калориметрической жидкости  $Q = g_k C_k (t_0 - t'_n)$ , где  $g_k$  — вес воды в калориметре,  $C_k$  — теплоемкость воды в интервале температур  $t_0$  и  $t'_n$ ;  $t_0 - t'_n$  — изменение температуры калориметрической жидкости от теплоты растворения  $KCl$  с учетом поправки  $\Delta t$

на теплообмен, определение которой описано ниже. Тепловое значение калориметра

$$K = \frac{Q}{t_0 - t'_n} - g_k C_k. \quad (108)$$

Влажную навеску почвы в 15—20 г помещают в латунный никелированный бюкс и выдерживают в течение суток в криостате или в ультратермостате (см. рис. 88), где отрицательную температуру поддерживают с помощью охлаждающих смесей (см. табл. 10 приложения) на определенном заданном уровне, например:  $-5^\circ$  или  $-10^\circ\text{C}$ .

Через 10—15 мин после сборки калориметра, когда установлен постоянный ход температуры в нем (перед погружением почвы в калориметр), производят наблюдения за температурой в калориметре по термометру Бекмана в течение 10 мин. Отсчет и запись температуры делают каждую минуту, что необходимо для учета потери тепла на радиацию —  $\Delta t$ . После этого образец в криостате или из ультратермостата подносят к калориметру и через трубку из изоляционного материала бюкс с почвой быстро переносят в калориметр. Наблюдения за ходом температуры в калориметре продолжают и отсчеты делают каждую минуту. В калориметре происходит таяние льда в образце почвы, что влечет за собой понижение температуры в системе. Отсчет по термометру Бекмана продолжают до тех пор, пока температура не начнет подниматься, что показывает, что весь лед в почве растаял. Затем делают еще 10 отсчетов и на этом определение заканчивают. Запись производят по форме табл. 46. После калориметрирования в образце почвы методом сушки определяют количество воды —  $g_w$ . На основании проведенных наблюдений сначала вычисляют поправку на теплообмен —  $\Delta t$  и затем количество замерзшей воды в почвенном образце —  $g_A$ . В течение опыта калориметрические системы теряют часть тепла за счет радиации в окружающую среду. Поправку на радиацию вычисляют по формуле:

$$\Delta t = \frac{\left[ \sum_1^{n-1} t + \frac{t_0 + t_n}{2} - nQ_0 \right] \cdot (v' - v)}{Q_n - Q_0} + nv,$$

где  $n$  — длительность опыта в минутах,  $v$  — изменение температуры калориметрической системы перед опытом в минуту,  $v'$  — то же после опыта,  $Q_0$  — средняя температура по измерениям перед опытом,  $Q_n$  — то же после опыта,  $t_0$  и  $t_n$  — начальная и конечная температура во время опыта,  $\sum_1^{n-1} t$  — сумма температур калориметра в течение опыта за исключением последнего отсчета —  $(t_n)$ ,  $t_n'$  — конечная температура главного периода опыта с учетом поправки на теплообмен =  $t_n + \Delta t$ .

Для определения количества замерзшей воды вычисляют теплоту поглощения  $Q$ , идущую на отепление до  $0^\circ\text{C}$ , и оттаивание льда в образце почвы, нагревание почвы, бюкса, незамерзающей

Форма записи и вычисления  $\Delta t$ 

Период	Время	Отсчет по термометру Декмана	Вычисление $\Delta t$
Начальный (перед опытом)	$t_0$		
	1	3,845	$Q_0 = \frac{3,845 + 3,835}{2} = 3,840$
	2	843	$v = \frac{3,845 - 3,835}{10} = 0,0010$
	3	842	$Q_n = \frac{3,205 + 3,225}{2} = 3,215$
	4	842	$v^1 = \frac{3,205 - 3,225}{10} = -0,0020$
	5	840	$\frac{t_0 + t_n}{2} = \frac{3,835 + 3,205}{2} = 3,520$
	6	839	$nQ_0 = 3,840 \cdot 9 = 34,560$
	7	838	$\sum_1^{n-1} = 26,615$
	8	—	
	9	—	
10	3,835		
Главный (опыт)	$t_n$		
	1	3,610	$\sum_1^{n-1} + \frac{t_0 + t_n}{2} - nQ_0 = -4,425$
	2	480	$v^1 - v = -0,0030$
	3	360	$Q_n - Q_0 = -0,625$
	4	265	$nv = 0,0010 \cdot 9 = 0,009$
	5	250	
	6	235	$\Delta t = \frac{-4,425 - (-0,0030)}{-0,625} = 0,009 = -0,012$
	7	210	
	8	205	
	9	3,205	
Конечный (после опыта)	$t_{кон.}$		
	1	3,205	
	2	209	
	3	211	
	4	213	
	5	215	
	6	219	
	7	221	
	8	223	
	9	224	
10	3,225		

воды и воды, полученной из льда до температуры равновесия, и отдача тепла калориметром, при охлаждении его от начальной до равновесной температуры. Поглощенное тепло:

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6, \quad (109)$$

где  $q_1$  — расход тепла на нагревание льда от температуры образца  $t_{обп}$  до  $0^\circ = g_A \cdot C_A$ ,

$q_2$  — расход тепла на таяние льда  $= g_A \cdot 79,75$ ;

$q_3$  — тепло, затраченное на нагревание воды, образовавшейся после таяния льда, от  $0^\circ$  до температуры равновесия  $t_n^1$ :

$$q_3 = g_A \cdot C_A (t_n^1 - 0^\circ);$$

$q_4$  — нагревание незамерзшей воды в почве от температуры образца  $t_{обп}^\circ$  до температуры  $t_n^1 = g_{нв} \cdot C_{нв} (t_n^1 - t_{обп}^\circ)$ ;

$q_5$  — нагревание почвы от  $t_{обп}^\circ$  до  $t_n^1 = g_n \cdot C_n (t_n^1 - t_{обп}^\circ)$ ;

$q_6$  — нагревание бюкса от  $t_{обп}^\circ$  до  $t_n^1 = g_b \cdot C_m (t_n^1 - t_{обп}^\circ)$ .

Обозначения:

$g_b$  — общее количество воды в почве;

$g_A$  — количество льда в почве;

$g_{нв}$  — количество незамерзающей воды;

$g_n$  — вес почвы;

$g_b$  — вес бюкса;

$C_A$  — теплоемкость льда;

$C_b$  — теплоемкость свободной воды;

$C_{нв}$  — теплоемкость связанной воды;

$C_n$  — теплоемкость почвы;

$C_m$  — теплоемкость латуни  $= 0,09$ ;

$t_{обп}^\circ$  — температура образца;

$t_0$  — начальная температура, приведенная к показаниям обыкновенного термометра;

$t_n^1$  — равновесная температура с учетом поправки на теплообмен, приведенная к показаниям обыкновенного ртутного термометра.

Отдача тепла калориметром

$$Q_1 = [(g_K \cdot C_K) + \kappa] \cdot (t_0 - t_n^1), \quad (110)$$

$g_K$  — количество воды в калориметре в граммах,

$C_K$  — теплоемкость воды в калориметре для температуры средней между  $t_0$  и  $t_n^1$ ;

$\kappa$  — тепловое значение калориметра.

Остальные обозначения те же, что и в формуле (109).

В состоянии равновесия  $Q_1 = Q$ . Количество незамерзающей воды в граммах

$$g_{нв} = g_b - g_A. \quad (111)$$

Заменяя незамерзшую воду  $g_{нв}$  через  $g_b - g_A$ , принимая температуру плавления льда  $= 0^\circ$ , теплоемкость незамерзающей воды  $C_{нв} = 1$ , разность теплоемкостей воды и льда  $= 0,5$ , получаем следующую формулу для определения замерзшей воды в почве:

$$g_A = \frac{(g_K \cdot C_K + \kappa)(t_0 - t_n^1) - (t_n^1 - t_{обп}^\circ)(g_b C_b + g_n C_n + g_b \cdot 0,09)}{79,75 + \frac{t_{обп}^\circ}{2}}. \quad (112)$$

Количество незамерзающей воды в граммах —  $g_{нв} = g_{в} - g_{л}$  и в %

$$W_{нв} \% = \frac{g_{нв} \cdot 100}{g_n} \quad (113)$$

По количеству замерзшей воды вычисляют коэффициент льдистости

$$i = \frac{g_{л}}{g_{в}} \quad (114)$$

$$\text{и льдонасыщенности } y = \frac{g_{л}}{g_{в} + g_n} \quad (115)$$

Пример вычисления: пусть вес воды в калориметре  $g_{к} = 1200$  г, тепловое значение калориметра  $K = 80$ , вес воды в почве  $g_{в} = 7,80$  г, вес почвы  $g_n = 10,48$  г, вес бюкса  $g_{б} = 42,90$  г, теплоемкость воды  $C_{в} = 1$ , почвы  $C_n = 0,19$ . Наблюдением за ходом калориметра вышеописанным способом было установлено, что  $\Delta t = -0,012$ , конечная температура во время опыта (главный период) с поправкой на радиацию —  $t'_n = 3,205 + (-0,012) = 3,193$ , конечная температура первого периода (перед опытом) —  $t_0 = 3,835$   $t_0 - t'_n = 3,835 - 3,193 = 0,642$ . После приведения  $t_0$  и  $t'_n$  к показаниям обыкновенного термометра  $t_0 = 19,10^\circ$ ;  $t'_n = 18,46^\circ$ . Разница  $t_0 - t'_n = 19,10 - 18,46 = 0,64$ . Так как температура взятого образца почвы —  $t_{обр}^\circ = -1,2^\circ$ , то  $t'_n - t_{обр}^\circ = 18,46 - (-1,20) = 19,66$ . Подставляя в уравнение 79 значения вычисленных отдельных членов, получим:

$$g_{л} = \frac{(1200 \cdot 1,0 + 80) \cdot 0,64 - 19,66 (7,8 \cdot 1,0 + 10,48 \cdot 0,19 + 42,9 \cdot 0,09)}{79,75 + \frac{-1,20}{2}} =$$

$$= \frac{819,2 - 268,4}{79,15} = \frac{550,8}{79,15} = 6,96 \text{ г.}$$

Количество незамерзшей воды  $g_{нв} = 7,80 - 6,99 = 0,81$  г или в %

$$W_{нв} \% = \frac{0,81 \cdot 100}{10,48} = 7,73.$$

Попутно вычисляются: коэффициент льдистости

$$i = \frac{g_{л}}{g_{в}} = \frac{6,96}{7,80} = 0,89$$

и льдонасыщенность

$$y = \frac{g_{л}}{g_{в} + g_n} = 0,380.$$

Таким образом, из общего количества воды 7,8 г (или 74,43% от веса сухой почвы) при выдерживании образца при температуре —  $1,2^\circ$  в лед перешло 66,7% воды, 7,73% воды при этой температуре не замерзло.

## ГЛАВА X

### ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ

К физико-механическим свойствам почвы относят твердость, или сопротивление сдавливанию и расклиниванию, липкость, пластичность, набухание и другие, определяющие, в основном, технологические свойства почвы. Знание этих свойств почвы необходимо для правильного конструирования сельскохозяйственных орудий и машин, расчетов удельного сопротивления почвы при обработке и перекачивании машин по ней. Физико-механические свойства почвы определяют износ соприкасающихся с ней отдельных частей орудий обработки и коэффициент их полезного действия.

Физико-механические свойства определяют качество обработки и характер деформации почвы при работе сельскохозяйственных машин. Очень большое значение имеет знание физико-механических свойств почво-грунта при строительных работах, а также в керамической промышленности.

Физико-механические свойства оказывают влияние на рост и развитие корневых систем растений. Поэтому понятен интерес к изучению этих свойств. Исследования ведут, с одной стороны, в целях изучения влияния физико-механических свойств на работу машин и орудий, с другой стороны,—по выяснению влияния последних на почву.

#### ТВЕРДОСТЬ ПОЧВЫ

Твердость почвы есть сопротивление ее вертикально приложенной силе при разрезании, расклинивании или сдавливании<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Не следует понятие «твердость» смешивать с понятием «плотность». Под плотностью понимают сложение почвы (рыхлое, плотное и т. п.), определяемое укладкой механических элементов или агрегатов. Количественно ее выражают величиной объемного веса, или порозности.

Высокая твердость почвы часто снижает всхожесть семян, оказывает механическое сопротивление развивающейся корневой системе растений, влияет на развитие растений, изменяя водный, воздушный и тепловой режим почвы. Твердость — важная технологическая характеристика почвы. При работе плуга подрезание пласта почвы осуществляют в вертикальном направлении ножом и в горизонтальном — лемехом. Моделируя работу плуга в почве, определяют сопротивление расклиниванию или разрезанию в вертикальном и горизонтальном направлениях и выражают расклинивающее сопротивление в  $кг/см^2$ , используя в качестве датчиков в твердомерах заостренные наконечники — плунжеры в виде конуса, клина или цилиндра с малой площадью. Чем выше твердость почвы, тем большее сопротивление оказывает она расклиниванию.

По поверхности почвы перекатывают машины и орудия. Твердость почвы при этом проявляется в сопротивлении сжатию или сдавливанию и оказывает большое влияние на тяговое сопротивление: чем больше твердость, тем меньше тяговые усилия при перекатывании. Сопротивление почвы сдавливанию определяют цилиндрическими плунжерами и выражают в  $кг/см^3$ .

Установлена тесная зависимость между тяговым сопротивлением почвы при обработке и перекатывании машин и твердостью почвы (Н. А. Качинский, Г. Б. Николаев, Н. В. Шучкин, А. Ф. Вадюнина, П. У. Бахтин и др.). Расчеты тяговых усилий производят по соответствующим формулам

Для определения твердости почвы предложено несколько приборов: твердомер Горячкина, ВИСХОМа (Высоцкого), Качинского и др.

**Определение твердости почвы прибором ВИСХОМа.** Твердомер ВИСХОМа. В основу этого прибора положен принцип твердомера Горячкина — сжатие пружины под влиянием сопротивления, оказываемого почвой погружаемому плунжеру. С помощью этого прибора можно определить твердость почвен-

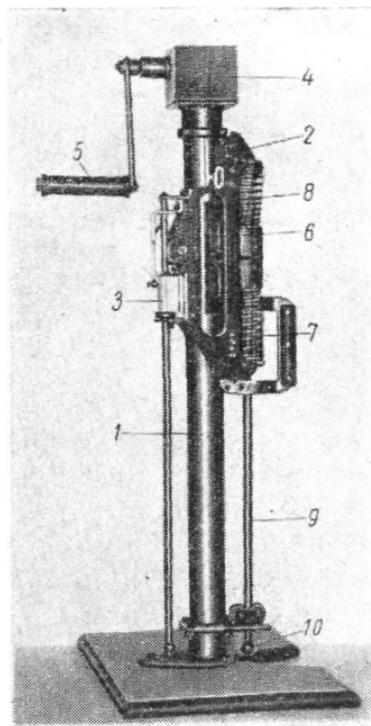


Рис. 103. Твердомер конструкции ВИСХОМа:

1 — трубчатая стойка, 2 — подвижная каретка, 3 — лентопротягивающий механизм, 4 — конические шестеренки, 5 — рукоятка, 6 — втулки, 7, 8 — силовые пружины, 9 — шток, 10 — плунжер

ного слоя до глубины 30 см, регистрируя ее по всей глубине самопишущим приспособлением.

*Описание прибора.* Прибор (рис. 103) состоит из трех основных частей: трубчатой стойки, подвижной каретки, лентопротягивающего механизма. Металлическая трубчатая стойка (1) укреплена на деревянной платформе. Червячный винт внутри стойки связан через конические шестеренки (4) с рукояткой для вращения (5). На внешней стенке стойки нанесены деления от 0 до 30 см для определения глубины погружения плунжера в почву. На стойке расположены передвигающаяся направляющая втулка (6) и подвижная каретка (2) с двумя опорами, между которыми заключены две силовые пружины (8 и 7). Каретка соединена с лентопротягивающим механизмом (3) и штоком (9). С помощью роликов каретка перекатывается по стойке при погружении плунжера в почву. Лентопротягивающий механизм состоит из двух валиков и барабана, укрепленных на диске, который, в свою очередь, идет на вертикальный неподвижный валик, имеющий винтовой паз. Перемещение диаграммной ленты осуществляется по пути перемещения плунжера с уменьшением в 3 раза. Пишущий штифт соединен с втулкой. Запись производят серебряным карандашом

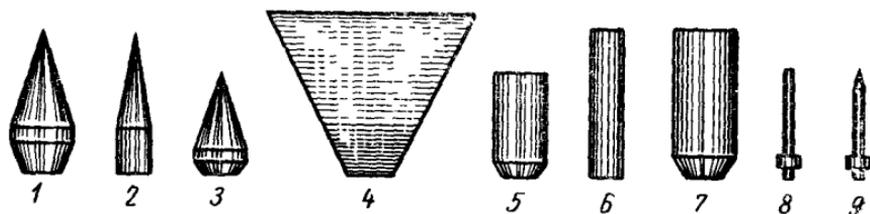


Рис. 104. Плунжеры

на меловой бумаге. Шток оканчивается винтовой нарезкой для навинчивания плунжера (10).

Плунжеры, используемые при работе, различны по форме и размерам площади поперечного сечения (рис. 104). По форме плунжеры бывают цилиндрические (5, 6, 7), шарообразные (на сдавливание), конические (1, 2, 3) и в виде трехгранного клина (4) (на расклинивание). По размерам площади поперечного сечения — в 1; 2; 2,8 и более см<sup>2</sup>. К плотномеру прилагают три пары сменных пружин: 25, 50 и 100 кг, каждая из которых имеет свою тарифовочную таблицу. На основании тарифовочных данных отдельных пружин работающему необходимо построить тарифовочную кривую плотномера для соответствующей пары пружин и в процессе эксплуатации прибора периодически производить проверку их.

По способу, предложенному автором прибора, тарифовочную кривую плотномера строят на основании 2 тарифовочных кривых,

построенных отдельно для верхней и нижней пружин. На графике по оси абсцисс откладывают деформацию пружин в *см*, а по оси ординат — усилие (нагрузку) в *кг*. При построении кривых могут быть два случая:

1) Жесткость пружин верхней ( $g_1$ ) и нижней ( $g_2$ ) постоянны на различных ступенях нагрузки и тарировочные кривые той

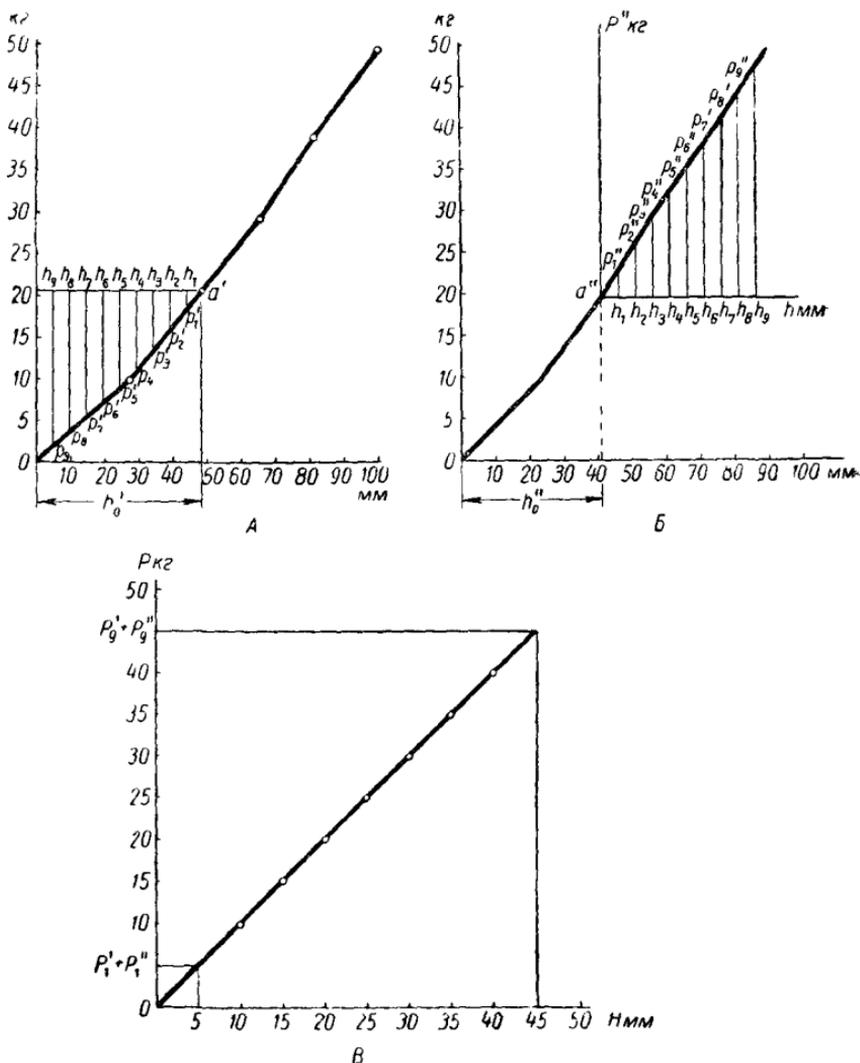


Рис 105. Тарировочные кривые:

А — для верхней пружины, Б — для нижней пружины, В — общая для плотмера

и другой пружин представлены прямыми линиями. В таком случае жесткость из двух, предварительно сжатых, пружин определяют как  $g = g_1 + g_2$ . По значению  $g$  строят тарировочную кривую, которую затем используют при обработке результатов измерений.

2) Жесткость обеих пружин или одной из них не постоянна, и тарировочные кривые имеют вид кривых линий. В таком случае сначала вычерчивают тарировочные кривые отдельно для верхней и нижней пружин. Замеряют длину пружин в свободном состоянии (длина свободной верхней —  $L_{св. в}$ , свободной нижней —  $L_{св. н}$  и длину их после установки в твердомер и проведения нулевой линии на диаграммной ленте (длина сжатой верхней пружины  $Z_{сж. в}$ , нижней —  $Z_{сж. н}$ ). Вычисляют величину предварительного сжатия пружин  $h'_0$  и  $h''_0$

$$h'_0 = L_{св. в} - L_{сж. в}$$

$$h''_0 = L_{св. н} - L_{сж. н}$$

На тарировочных кривых пружин (рис. 105 А, Б, В) по оси абсцисс откладывают значения  $h'_0$  и  $h''_0$ , по оси ординат откладывают нагрузки до полного сжатия пружин. На пересечении перпендикуляров, соответствующих максимальному сжатию и нагрузке —  $a'$  и  $a''$ , строят новую систему координат. Для верхней пружины эти оси проводят для зоны кривой от 0 до  $a'$ , так как эта пружина при работе твердомера разжимается, а для нижней пружины в зоне кривой от  $a''$  до максимума, так как эта пружина при работе сжимается.

На новых координатах по осям абсцисс откладывают участки  $h_1, h_2, h_3$  и т. д. и соответственно им по масштабу определяют ординаты  $P_1, P_2$  и т. д. и  $P'_1, P''_2$  и т. д.

На основании кривых для отдельных пружин (рис. 105, А и Б) строят тарировочную кривую твердомера (рис. 105, В) путем суммирования ординат, полученных для каждого участка сжатия по обоим пружинам, т. е.

$$P_1 = P'_1 + P''_1 \text{ для } h_1 = 5 \text{ мм}$$

$$P_2 = P'_2 + P''_2 \text{ для } h_2 = 10 \text{ мм и т. д.}$$

По оси абсцисс откладывают деформацию силовой части  $H$ , по оси ординат — усилия на плунжере  $P$ . Построенная кривая твердомера прямолинейна, ее используют при обработке диаграмм, снятых при измерении твердости почвы.

Вращательное движение от рукоятки (5) через шестерни (4) передают на червячный винт, а затем на шток (9) с плунжером (10). Плунжер давит на почву, которая обладает определенной твердостью, и оказывает сопротивление внедрению плунжера, передающееся на силовые пружины (8 и 7). Соответственно сжатию пружин происходит перемещение рычага с серебряным штифтом, записывающим диаграмму на бумаге. Стрелка, укрепленная на каретке, перемещается вместе с перемещением штока и указывает глубину погружения плунжера в почву.

*Ход определения.* Прибор устанавливают на подготовленную площадку. Два человека встают на деревянную платформу для того, чтобы придать прибору большую устойчивость и избежать подъема его. Вращением рукоятки прибора (со скоростью одного оборота в секунду) погружают плунжер в почву на

задаваемую глубину. Для извлечения плунжера из почвы рукоятку вращают в обратную сторону.

Твердость почвы этим твердомером следует определять не менее чем с пятерной повторностью на площади  $1 \text{ м}^2$ , размещая точки по углам и в центре квадрата или по прямой линии на типичной площадке через каждый метр. На полученной диаграмме ставят соответствующий номер, дату определения, почву, угодье и пункт.

*Расшифровка диаграмм и расчет твердости.* Схематично диаграмма твердости имеет вид, показанный на рис. 106.

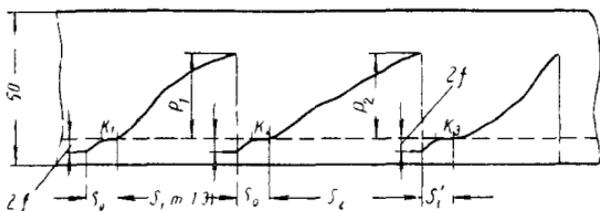


Рис. 106. Диаграмма твердости почвы, полученная прибором ВИСХОМа

От начала движения плунжера вниз по пути  $S_0$  до момента соприкосновения его с почвой и совмещения стрелки с нулевой отметкой (риской) на шкале на диаграммной ленте запишется кривая на участке  $S_0$  с отклонением от первоначального положения на величину  $2f$ , что соответствует величине всех сил трения, возникающих в приборе. На диаграммах получают участки  $K_1$ ,  $K_2$  и другие, которые при обработке диаграмм соединяют линией, принимаемой за нулевую. Таким образом учитывают вес подвижных частей прибора, действующих на силовые пружины, а также силу трения.

С помощью планиметра определяют площадь диаграммы, принимая за основание нулевую линию, затем находят среднюю ординату.

Средняя твердость почвы в  $\text{кг/см}^2$  вычисляют по формуле:

$$P = \frac{h \cdot n}{S}, \quad (116)$$

где  $h$  — величина средней ординаты в  $\text{см}$ , вычисленной по диаграмме (можно также для этого взять  $h$  на любой глубине погружения плунжера 5—10—15  $\text{см}$  и т. д.),  $n$  — масштаб пружины в  $\text{кг/см}$ ,  $S$  — площадь поперечного сечения плунжера в  $\text{см}^2$ .

В случае работы с цилиндрическим плунжером расчет средней твердости ведут на единицу объема скважины, т. е.

$$P = \frac{h \cdot n}{V},$$

где  $V$  — объем скважины (площадь плунжера, умноженная на глубину погружения в почву).

**Определение твердости почвы прибором Качинского.** Твердомер Качинского устроен по револьверному принципу; силой разжатия пружины плунжер погружается в почву и потому показания прибора не зависят от силы работающего. Прибор портативен, не сложен в обращении, его используют для определения твердости при исследовании физико-механических свойств почвы в полевых и лабораторных условиях. Им удобно пользоваться для определения твердости почвы по генетическим горизонтам при морфологическом описании почвенного профиля. Определение твердости этим твердомером можно проводить в стенке почвенного разреза и по горизонтам — на рабочих площадках, подготовленных для определения других физических свойств почвы.

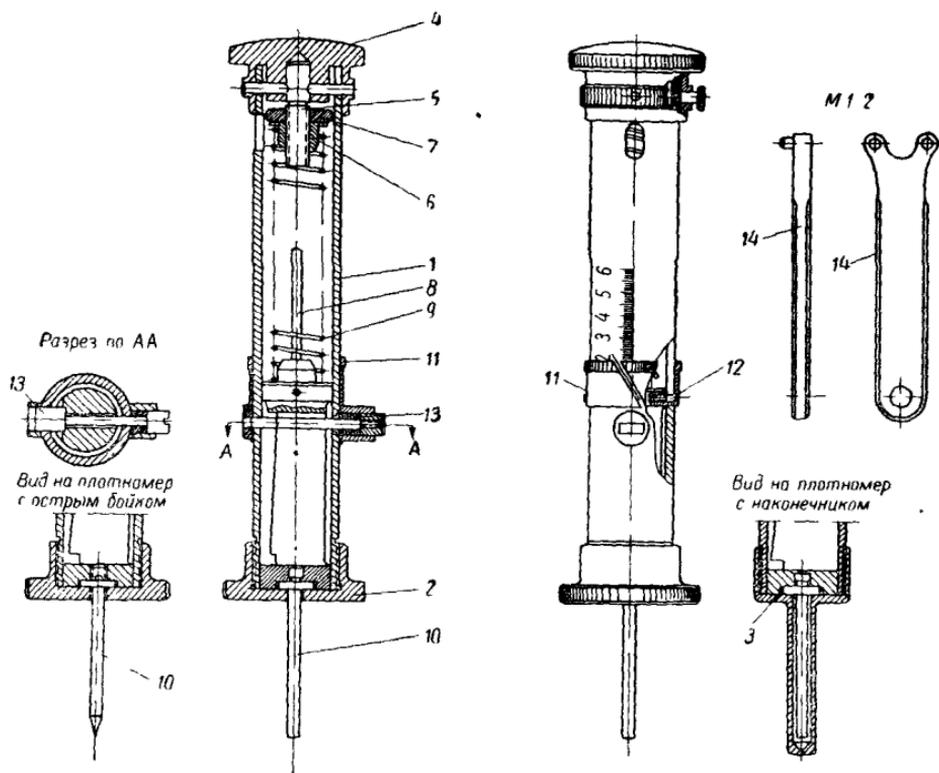


Рис. 107. Твердомер Н. А. Качинского:

1 — металлический корпус, 2 — опорный диск, 3 — глухой наконечник, 4 — головка, 5 — винт  
6, 7 — шайбы, 8 — поршень, 9 — пружина, 10 — плунжер, 11 — кольцо указатель, 12 — винты  
13 — кнопка, 14 — ключ

Твердомер Качинского (рис. 107) состоит из цилиндрического металлического корпуса (1) длиной 22,5 см при внутреннем диаметре 3 см и толщине стенки 3 мм. Снизу корпус закрыт навинчивающимся опорным диском (2) диаметром 6 см с отверстием для плунжера. Сверху на корпус одета головка (4), закрепляемая байолитными замками и винтом.

Винт (5) помещен внутри головки, по его нарезки двигаются шайбы (6 и 7).

Внутри корпуса помещен свободно скользящий поршень (8) и пружина (9), опирающаяся нижним концом на головку поршня, а верхним — на направляющую шайбу (7). На нижний конец поршня навинчивают плунжер (10) длиной 60 мм с площадью поперечного сечения  $0,2 \text{ см}^2$ . В зависимости от цели работы плунжер может быть цилиндрическим или коническим (см рис. 104, 8, 9).

На корпусе твердомера нанесена шкала с миллиметровыми делениями от 0 до 60. Длина 60 мм соответствует максимальному ходу плунжера. Отсчет делений по шкале производят с помощью подвижного кольца-указателя (11). В кольце-указателе сделаны прорезы, которыми оно ложится на специальные винты (12), имеющиеся в верхней части поршня и выходящие наружу через боковые прорезы в корпусе твердомера. Двигаясь вверх, поршень двигает и кольцо-указатель. Поднимаясь вверх до предела, поршень сжимает пружину и в этом положении удерживается пружинной защелкой с кнопкой (13). Нажатием на кнопку защелку выводят из зацепления, и пружина выталкивает поршень вперед.

В зависимости от сопротивления почвы усилие на плунжер можно менять перестановкой пружин. В комплекте твердомера имеются пружины, создающие при максимальной деформации усилия на плунжер в 0,6; 2; 3; 4; 6; 8; 12; 16; 18 кг.

Прибор отградуирован для каждой из прилагаемых пружин и в комплект его входит тарировочная таблица с ценой каждого миллиметрового деления на шкале корпуса. В процессе использования твердомера цена деления может изменяться, поэтому необходимо периодически производить проверку тарировочных данных.

При тарировке прибора для случаев работы с ним на горизонтальных площадках необходимо учитывать и вносить в тарировочную шкалу поправку на его вес.

Имея тарировочную таблицу, работающий записывает показания по шкале прибора, а затем в таблице находит соответствующее значение сопротивления почвы. Умножая на коэффициент 5, сопротивление приводят к площади на  $1 \text{ см}^2$ . Перед началом работы в корпус твердомера вставляют соответствующую пружину и в рабочей тетради записывают ее номер. Пружина, опираясь нижним концом на головку поршня, верхним концом должна вплотную, но без сжатия, подходить к шайбе 7 в головке твердомера. Это расстояние регулируют свинчиванием шайбы вверх или вниз. В твердомер ввинчивают, в зависимости от поставленной цели, цилиндрический или конический плунжеры. Смену плунжеров производят с помощью ключа (14), прилагаемого к комплекту твердомера. Поставив твердомер вертикально плунжером на твердую поверхность

(монета, металлическая пластина), надавливают на головку рукой так, чтобы плунжер до предела вошел внутрь корпуса. С помощью защелки поршень закреплен в этом положении, а пружина находится в сжатом до предела состоянии.

Подготовленный прибор устанавливают на поверхность почвы в вертикальном или горизонтальном положении и, надавливая правой рукой на головку (4), левой нажимают на кнопку (13), выводя поршень из зацепления. При разжатии пружины плунжер погружается в почву. Выжидают 30 сек (считая до 30), а затем, не отпуская головки твердомера, левой рукой продвигают кольцо-указатель (11) до винтов (12); придерживая кольцо, поднимают твердомер и записывают показания по шкале.

Твердость определяют с десятикратной повторностью, а затем из контрольных определений выводят среднее значение сопротивления почвы сдавливанию или расклиниванию. Характеристика твердости почвы должна обязательно сопровождаться данными по ее влажности. Поэтому одновременно с определением сопротивления почвы сдавливанию и расклиниванию берут образцы на влажность. Обычно твердость почвы определяют в динамике, в зависимости от влажности.

Результаты измерения твердости почвы, сопровождаемые данными по влажности (абсолютной или относительной), оформляют в таблицы и графики.

Есть и более простые твердомеры, работающие по принципу копра (Э. Митчерлиха, Н. И. Железнова, С. А. Захарова, М. И. Волкова, Гаспаряна, Конти, В. В. Киквадзе и др.). Они представляют собой стержни с наконечником в виде конического острия или лопаты. В почву их погружают, сбрасывая с определенной высоты. Достоинство этих приборов в простоте, что делает возможным изготовление их при отсутствии сложного оборудования.

Динамометрический лом Захарова имеет форму стамески, имеющей шкалу, разделенную на сантиметры. Длина ломика 60 см; толщина рабочей части — 0,25 см; ширина 1 см; длина шкалы — 10 см. Общий вес его 250 г. Ломик бросают отвесно с высоты 40 см и по глубине погружения его судят о твердости почвы.

Лопата твердомер Киквадзе представляет собой узкую лопату (шириной 5—7 см, высотой 20—25 см), закрепленную на черенке длиной 170—180 см, диаметром около 2 см. По черенку скользит кольцевая гиря весом 2—3 кг. Установив лопату на исследуемый участок почвы, спускают по черенку гирю, ударяющуюся о плечики лопаты. По глубине погружения лезвия судят о твердости почвы. Подобным несложным твердомером можно получить относительную характеристику почв по твердости и использовать эти данные при оценке обрабатываемых участков по трудности обработки и перекатывания сельскохозяйственных машин.

## Сопротивление почв и грунтов сдвигу

При сдвиге внутри почвы или грунта площадки по отношению ко всей массе почвы сопротивление сдвигающим (касательным) усилиям складывается из сцепления, обусловленного молекулярными и капиллярными силами, и сил внутреннего трения. Напряжение сдвигающих усилий, превышающих сопротивление сдвигу, вызывает разрыв (срез) в почве и скольжение по плоскостям среза, которому противодействует трение.

Силы сцепления не зависят от нормальной нагрузки, тогда как трение в известной мере пропорционально ей.

Кулон при изучении оползней установил, что тангенциальное усилие —  $P$  кг/см<sup>2</sup> при перемещении одного пласта почвы (грунта) по отношению к другому, нормальное давление —  $Q$  кг/см<sup>2</sup> и сцепление частиц —  $C$  кг/см<sup>2</sup> связаны уравнением;

$$P = C + Q \operatorname{tg} \varphi, \quad (117)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi$  — угловой коэффициент, он же коэффициент внутреннего трения. Если обозначить  $\operatorname{tg} \varphi$  через  $f$ , то уравнение прямой, показывающей зависимость сопротивления почвы сдвигу, примет вид:

$$P = C + Qf.$$

В песчаных почвах и в песках силы сцепления между частицами отсутствуют, поэтому сопротивление сдвигу в них равно сопротивлению внутреннего трения  $P = Q \cdot f$  и пропорционально вертикальной нагрузке.

Для определения сопротивления почв и грунтов сдвигу используют приборы конструкции Савельева, М. И. Захарьева, Маслова-Враского и учреждений Гидропроекта и ЦНИИМПС (Центральный научно-исследовательский институт Министерства путей сообщения). Наиболее точный и сложный прибор ЦНИИМПС мало распространен. Широкое применение в практике получил прибор Гидропроекта, благодаря простоте конструкции и удовлетворительной сходимости данных полевых и лабораторных определений.

Прибор на сдвиг конструкции Гидропроекта (рис. 108) состоит из коробки (1), нижняя часть которой неподвижна, верхняя — смещается. Обе части коробки скреплены шпильками (2). Коробку устанавливают на металлической станине (4) в ванне (3). Коробка имеет цилиндрическую форму с диаметром в 5 и высотой 2 см, куда и помещают испытуемую почву (5). Основание этого цилиндра представляет собою металлическую пластину (6) с отверстиями диаметром 0,5 мм. Применяемое в опыте вертикальное давление передает штамп (7), имеющий с верхней стороны углубление для шарика, с опирающейся на него серьгой (8). На серьгу через рычаг с отношением плеч 1:5 подвешивают груз (9). Подъемный винт (10) при сдвиге раздвигают на 1—2 мм обе части коробки. Тяга (11)

и двухступенчатый шкив (12) с подвешенным для груза ведром передают сдвигающее усилие.

Из монолита почвы вырезают образец, соответствующий размеру рабочего цилиндра, на который устанавливают штамп с вертикальной нагрузкой, под которой образец выдерживают 12—16 час до прекращения усадки, что регистрируют мессурой. Для определения сдвига извлекают шпильки, скрепляющие коробку и подъемник винтом (10), создают в ней зазор. Устанавливают в горизонтальном положении мессуру так, чтобы

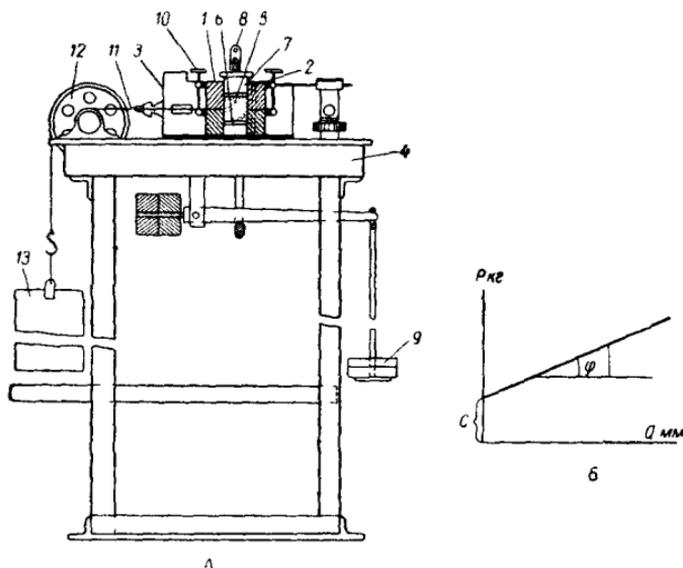


Рис. 108 Схема прибора гидропроекта для определения сопротивления на сдвиг:

А — схема прибора 1 — коробка, 2 — шпильки, 3 — ванна, 4 — металлическая станина, 5 — образец почвогрунта, 6 — металлическая пластина, 7 — штамп, 8 — серьга, 9 — груз, 10 — винт, 11 — тяга, 12 — шкив, 13 — ведро, Б — диаграмма

ножка его упиралась в верх коробки. Тангенциальное сдвигающее усилие создают весом воды, которую подают в ведро из мерного сосуда. В начале опыта учитывают вес воды, соответствующий примерно 0,1 доли нормальной нагрузки, затем после значительной деформации почвы вес воды уменьшают до 0,05 доли. Воду подают отдельными порциями с промежутками, необходимыми для затухания деформации после каждой порции воды. Определение закончено, когда сдвиг почвы станет непрерывным. По окончании опыта из прибора извлекают почву и отбирают пробы для определения влажности и объемного веса. Определение производят при трех вертикальных нагрузках  $Q$ : 1,2 и 3  $\text{кг}/\text{см}^2$ . Строят график (рис. 108, Б), откладывая по оси абсцисс нормальные нагрузки  $Q$ , по оси ординат —

тангенциальное усилие. Соединяют две экспериментальные точки прямой и продолжают ее до точки пересечения с ординатой, отрезок на ординате от  $O$  до точки пересечения дает величину  $C$  в кг на площадь образца. Разделив  $C$  на площадь образца, получают коэффициент сцепления в  $кг/см^2$ . По этой же кривой можно определить и коэффициент внутреннего трения  $f = \text{tg } \varphi$ .

В полевых условиях для определения сдвига можно использовать твердомеры Горячкина или ВИСХОМа. Для этого изготовляют две рамы  $15 \times 15 \times 30$  см с площадью, соответственно,  $450$   $см^2$ . На месте определения окапывают монолит почвы такого же размера, как и ящик, но высотой на  $5$  см больше. На почвенный монолит надевают рамы, причем верхняя вместит в себя слой почвы толщиной в  $5$  см; его-то и будут сдвигать по отношению к первому монолиту. Естественно, что сдвигать можно слой любой толщины, сообразуясь с поставленной задачей.

Перед монолитом в горизонтальном положении устанавливают прибор Горячкина или ВИСХОМа (рис. 109, А), железной станиной нижний монолит прикрепляют к основанию прибора, плунжер (тупой) проектируют в центр сдвигаемого ящика. На верх этого ящика кладут доску соответствующего размера с грузом, обеспечивающим задаваемое давление —  $5$ — $10$  кг. Сдвигают верхний ящик по отношению к нижнему и записывают сдвигающее усилие на диаграмме самописца твердомера. Кривая на мягких почвах (рис. 109, Б) имеет максимум в момент разрыва образца и затем идет почти параллельно оси абсцисс. Последняя часть кривой соответствует усилию —  $Qf$ , максимум кривой — общее тангенциальное усилие —  $P$ . Следовательно,  $C = P - Qf$ . Пусть  $P = 40$  кг;  $Qf = 20$  кг, тогда  $C = 40 - 20 = 20$  кг, а отнесенное к единице поверхности

$$C = \frac{20}{450} = 0,044 \text{ кг/см}^2$$
. Расчет  $C$  и  $f$  можно произвести графически, как описано выше, для чего проводят два-три определения с разными нагрузками. На почвах с высоким сцеплением диаграмма имеет другой характер вследствие сильных пружин (рис. 109, В) и дает только суммарное сдвигающее усилие —  $P$ , на основании которого вычисляют коэффициент сдвига

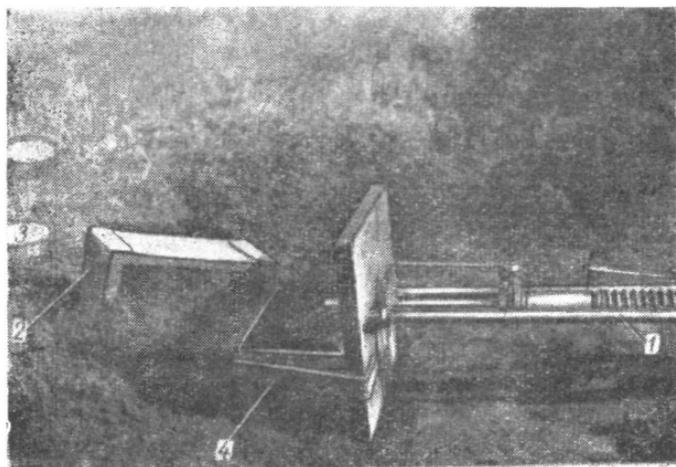
$$C = \frac{P}{S},$$

где  $S$  — площадь исследуемого образца.

Коэффициент сцепления резко изменяется в зависимости от культурного состояния почвы, например, на целине обыкновенного чернозема  $C = 0,267$   $кг/см^2$ , на черном пару —  $0,013$   $кг/см^2$

В практике при изучении сдвига иногда бывает трудно разделить силы сцепления и внутреннего трения. Тогда определяют общую величину сдвигающего усилия и вычисляют коэффициент сдвига в  $кг/см^2$ .

*Коэффициент трения.* Трение металл-почва можно определить как силу сопротивления скольжению металла по почве. Основные силы, определяющие величину коэффициента трения, — силы взаимного молекулярного притяжения частиц по-



А

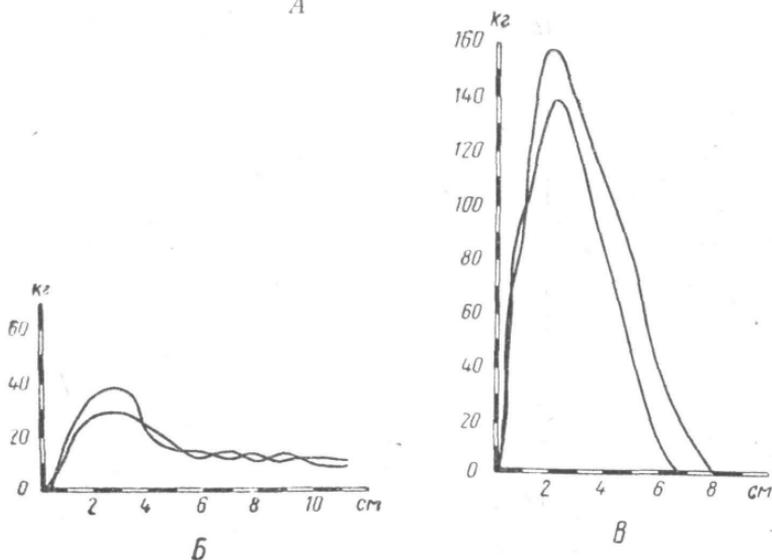


Рис. 109. Схема определения сопротивления почвы сдвигу:

А — твердомер Горячкина: 1 — ящики, 2 — шпильки, 3 — груз, 4 — станина, Б — диаграмма сдвига на мягких почвах, В — диаграмма сдвига на твердых почвах

верхностей металла и почвы. Подтверждением этому служат опыты, показавшие уменьшение трения в процессе вспашки при пропускании через отвалы лемеха постоянного тока, одноименного заряду почвы. Возникающая при этом благодаря электроосмосу водная пленка на рабочих частях плуга уменьшает при-

тяжение между трущимися поверхностями (снижает трение). Шероховатость поверхности металла тоже увеличивает сопротивление скольжению. При этом происходит увклинивание выступов металлической поверхности в почву, и возникают добавочные силы против движения сопротивления почвы сдвигу, поэтому полировка поверхности металла резко снижает это сопротивление.

В практике определяют коэффициент трения из уравнения Кулона:

$$P = fQ, \quad (118)$$

где  $P$  — тангенциальное усилие, необходимое для перемещения металла по отношению к почве,  $Q$  — нормальная нагрузка;  $f$  — коэффициент внешнего трения. Отсюда

$$f = \frac{P}{Q}. \quad (119)$$

Коэффициент трения — важная технологическая характеристика почвы, его используют в расчетах тяговых сопротивлений — в формуле Горячкина, Щучкина и др.

Величина коэффициента трения возрастает с увеличением влажности до появления липкости. Она выше на глинистых и бесструктурных почвах, чем на песках. Определение величины коэффициента трения —  $f$  Щучкин производил с помощью сконструированного им прибора.

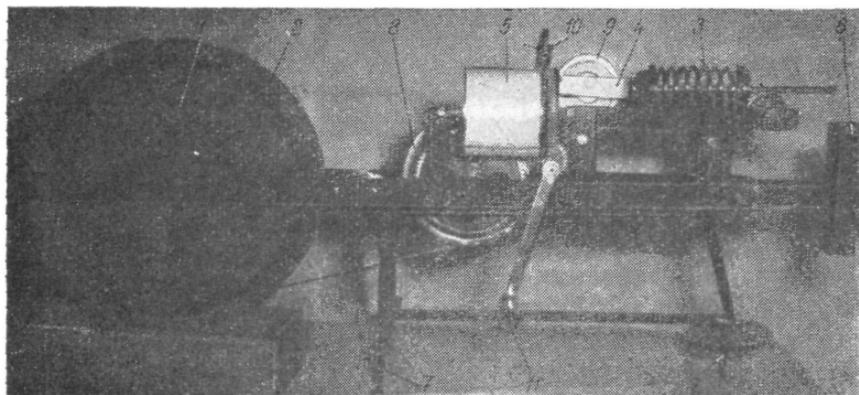
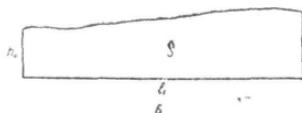


Рис. 110. А — прибор Синеокова:

1 — деревянный диск, 2 — шкив на диске, 3 — пружинный динамометр, 4 — подвижная рама, 5 — самописец, 6 — груз, 7 — ножки, 8, 9 — шкивы, 10 — держатель карандаша, 11 — ручка, Б — диаграмма



рованной им горки с металлической шлифованной поверхностью, угол наклона которой в момент начала скольжения по ней почвы характеризовал величину коэффициента трения  $f$ . Для этих же целей используют прибор Синеокова.

Прибор Синеокова (рис. 110, А и Б) состоит из деревянного диска (1) с неподвижным шкивом (2) и ободом из шлифованной стали, пружины динамометра (3) на подвижной раме (4), самописца (5) и системы передач.

Диск укреплен в металлической раме и легко вращается вокруг своей оси на шарикоподшипниках. Рама подвижно скреплена с остовом (неподвижной рамы прибора) и имеет металлическую пластину-хвост, на которой подвешивают грузопротивовес колесу (6). Остов прибора имеет три заостренные ножки (7) с упорами. При работе прибор заякоривают ножками в почву на глубину упоров. С помощью крученого шнура шкив (2) диска соединен со шкивом (8 и 9), что позволяет передавать сдвигающее усилие на динамометр. К подвижной раме динамометра прикреплен откидной держатель (10) для карандаша. Ручка прибора (11) через систему передач (шестерен) соединяет диск, динамометр и барабан самописца, на котором закреплена бумага для записи.

Вес диска с ободом 12 кг. Подвешивая груз на хвост рамы, вертикальное давление веса диска можно уменьшить до 4 или 8 кг, что необходимо при работе на рыхлых почвах. Удельное давление колеса на почву  $q$  вычисляют по формуле:

$$q = \frac{Q}{l \cdot b}, \quad (120)$$

где  $Q$  — вес колеса = 12 кг,  $l$  — длина хорды следа обода на почве в см,  $b$  — ширина обода = 8 см.

Ножки прибора вдавливают в почву, диск ставят на выравненную площадку почвы, затем при помощи рукоятки (10) делают поворот колеса на  $\frac{1}{3}$  длины его окружности. Заданный поворот совершают в течение 25—30 сек. Усилие, затраченное на перемещение колеса, регистрирует самописец на диаграмме. Измеряют на отпечатке колеса хорду для расчета  $q$  и берут пробу почвы в сушильный стаканчик для определения влажности. Для вычисления коэффициента трения перед работой градуируют пружину при разных нагрузках. При этом по оси ординат откладывают сжатие пружин в мм, по оси абсцисс — нагрузку в кг.

Пусть  $h$  масштаб сжатия пружины в кг/мм.

На снятой диаграмме (рис. 110, Б) по оси абсцисс фиксируют линейное перемещение обода колеса —  $l_1$ , по оси ординат — сжатие пружины  $h$  — в мм.

Планиметром определяют площадь диаграммы —  $S$  в мм<sup>2</sup> или см<sup>2</sup>. Измерив линейкой ее длину  $l_1$ , вычисляют среднее значение величины сжатия пружины в опыте:

$$h = \frac{S}{l_1} \text{ мм.} \quad (121)$$

Тангенциальное (сдвигающее) усилие

$$P = h \cdot n \frac{D_1}{D_2},$$

где  $D_1$  — диаметр шкива,  $D_2$  — диаметр диска с ободом,  $n$  — нагрузка, вызывающая сжатие пружины на 1 мм.

Отсюда.

$$f = \frac{P}{Q} = \frac{h n D_1}{Q D_2},$$

где  $Q$  — вес колес с ободом = 12 кг.

Пусть диаметр шкива (2) = 356, а диаметр диска с ободом 400 мм, тогда формула примет вид:

$$f = \frac{h n 356}{Q 400}.$$

Повторность определения тройная.

Прибором описанной конструкции можно определять коэффициент трения металла по почве, стерне, культурной и сорной растительности.

### Липкость почвы

Липкость — способность почвы прилипать к соприкасающимся предметам: рабочим частям почвообрабатывающих орудий, к колесам перекачиваемых машин и орудий. Проявляется липкость тогда, когда сцепление между почвенными частицами становится меньше того, которое возникает между почвой и соприкасающимися с ней рабочими частями машин. Прилипание почвы к рабочим частям сельскохозяйственных орудий вызывает часто настолько большое сопротивление, что работа протекает с большой затратой энергии.

Величина липкости зависит от механического состава, структуры и влажности. Почвы глинистые и бесструктурные сильнее прилипают, чем легкие по механическому составу или структурные глинистые. Прилипать почва начинает уже при 60—80% влажности от общей влагоемкости; для бесструктурных почв эта величина ниже.

Липкость измеряют усилием в г на 1 см<sup>2</sup>, требующимся для отрыва от почвы прилипшего к ней предмета. Для определения липкости используют приборы Боуякоса, Шоппера, В. В. Охотина, М. Ф. Розена, Н. А. Качинского.

В лабораториях грунтоведения чаще всего используют прибор Охотина. В практике почвенных лабораторий наибольшее распространение имеет прибор конструкции Качинского.

Определение липкости почв и грунтов прибором Качинского. Прибор (рис. 111) представляет собой видоизмененные техно-химические весы, правая чашка которых заменена специальным подвесным стержнем, заканчивающимся

диск площадью  $10 \text{ см}^2$ . Диск и стержень уравнивают правой чашкой весов и алюминиевым стаканчиком определенного веса. Подвесной стержень имеет винтовое крепление, что позволяет изменять его длину. Коромысло прибора поставлено на неподвижную колонку, укрепленную на металлическом основании и, таким образом, имеет постоянную высоту. Опорой для призм коромысла служит стальная «подушка» верхней части колонки. Тяга внутри колонки поднимает и опускает арретир.

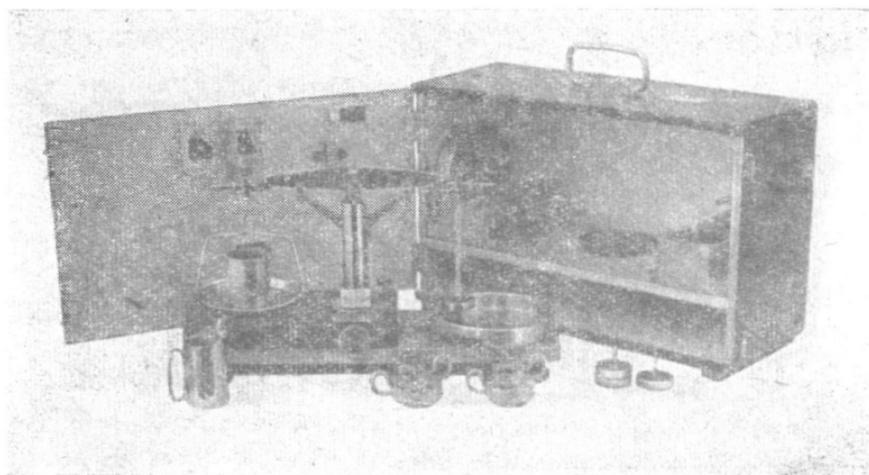


Рис. 111. Прибор Н. А. Качинского для определения липкости почвы

В нерабочем положении коромысло лежит на стойках приподнятого арретира. При работе арретир опускают, и опорная призма коромысла ложится на «подушку». Чашки и стержень с диском подвешены на коромысло на серьгах. На концах коромысла помещены тарировочные грузы, а в центре укреплена стрелка, с помощью которой производят отсчет по шкале, расположенной у основания колонки. Прибор установлен на тяжелой металлической плите. В комплект входит несколько дисков: стальной, латунный, деревянный, резиновый, используемых в зависимости от поставленной задачи. Для определения липкости почвы при ее обработке плугом употребляют стальной диск, при пневматических колесах машин — резиновый. К прибору прикладывают две гири, дополняющие вес диска со стержнем до 200 г и две гири, дополняющие вес диска со стержнем до 500 г. Формочки для образца почвы имеют сетчатое дно и заостренный верхний край (чтобы легче можно было врезать их в почву). Определение можно проводить на образцах нарушенного и ненарушенного сложения. Так как липкость почвы проявляется в определенном интервале влажности, то для установле-

ния границ исследования начинают с влажности, соответствующей общей влагоемкости, и, подсушивая почву, продолжают определения до прекращения прилипания почвы к диску.

*Ход определения.* Образец почвы или грунта, подлежащий исследованию, помещают в формочку, на сетчатое дно которой положен кружок из фильтровальной бумаги. В случае исследования липкости в поле в формочку берут образец ненарушенного строения. При взятии монолитика формочку устанавливают на поверхность почвы и надавливанием руки или при помощи специального шомпола погружают в почву до полного наполнения. Затем ее окапывают ножом и вынимают с некоторым запасом почвы. Излишек почвы срезают ножом вровень с краями формочки. При определении липкости почвы нарушенного сложения в формочку насыпают образец, пропущенный через сито с отверстиями диаметром 1—3 мм. Формочку с образцом почвы устанавливают в ванну с водой для насыщения до общей влагоемкости, после чего переносят на плиту прибора со стороны диска. На коромысло подвешивают диск и уравнивают его с чашкой. Удлиняя или укорачивая подвесной стержень, приводят в полное соприкосновение диск с почвой. Сверху на диск кладут гирию, которая с подвесным стержнем и диском должна весить 200 или 500 г<sup>1</sup>. Отпускают арретир и выдерживают груз 30 сек. Диск прилипает к почве. Придерживая рукой стержень, снимают груз. В стаканчик на левой чашке весов из песочницы сыпят тонкой струей чистый кварцевый песок до отрыва диска от почвы. Песок взвешивают. Передвинув формочку и вытерев диск, повторяют определение на новом месте. На одном образце производят пять определений. В качестве окончательного результата берут среднее из контрольных определений.

Вес песка соответствует силе, которая необходима для отрыва от почвы диска площадью 10 см<sup>2</sup>. Делением веса песка на площадь диска рассчитывают липкость почвы в г/см<sup>2</sup> площади. После определения липкости с поверхности образца почвы берут пробу на влажность. Через определенный промежуток времени на этом же образце производят повторные определения липкости и влажности и продолжают их до прекращения прилипания почвы к диску.

На основании полученных материалов составляют таблицу и график динамики липкости почвы в зависимости от ее влажности. По оси ординат откладывают липкость в г/см<sup>2</sup>, по оси абсцисс — относительную влажность.

Необходимое оборудование и материалы: прибор Качинского для определения липкости, весы техно-химические с разновесом, сушильные стаканчики, нож, песок, фильтровальная бумага.

<sup>1</sup> Выбор нагрузки определяется задачей исследования.

Способность почвы и грунта принимать приданную им во влажном состоянии форму и сохранять ее после прекращения внешнего воздействия называют пластичностью. Переувлажненные и сухие почвы не обладают пластичностью. Она проявляется в определенном пределе увлажнения. Пластичность зависит от механического и минералогического состава, а также от формы частиц, слагающих почву или грунт.

Аттерберг, изучая поведение системы почва-вода при разных соотношениях, выделил следующие константы: верхняя граница текучести — смесь глины с водой течет как вода; нижняя граница текучести — тесто почвы, будучи помещено в фарфоровую чашку и разделено на две половины шпателем, при ударе о внешнюю поверхность чашки рукой вновь сливается в единую массу; граница клейкости — влажность, при которой почва перестает прилипать к другим предметам; граница скатывания в шнур — при раскатывании почва распадается на отдельные кусочки.

Верхним пределом пластического состояния почвы служит влажность нижней границы текучести, нижним — влажность границы скатывания почвы в шнур. Величину пластичности измеряют числом пластичности, представляющим разницу в содержании воды в весовых процентах при нижней границе текучести и границе скатывания в шнур. В интервале увлажнения от нижней до верхней границы пластичности почва деформируется с сохранением приданной ей формы, максимально набухает, обладает слабым сопротивлением при внешнем механическом воздействии, при перекачивании по ней машин образуются колеи по ходу колес.

Определение нижней границы текучести (метод Аттерберга). Почву готовят обычным способом: отбирают корни, растирают ее в ступке с резиновым наконечником на пестике, просеивают через сито с отверстиями диаметром 1 мм. Около 20—30 г почвы помещают в фарфоровую или латунную чашку диаметром 12 см, замачивают водой до состояния густой пасты, при этом почву тщательно перемешивают шпателем, чашку плотно закрывают или открытой ставят в эксикатор с водой для предохранения от испарения, где оставляют пробу на сутки. После этого еще раз перемешивают почву, разравнивают слоем толщиной в 1 см и разрезают почвенную массу V-образным шпателем на равные части так, чтобы между ними образовалась щель шириною по дну чашки 1—1,5 и на поверхности почвы — 2—3 мм.

Затем по дну чашки ударяют 3 раза рукой или бросают ее три раза с высоты 6 см. Лучше эту операцию проводить на специальных приборах.

В приборе типа Охотина (рис. 112) металлическую

чашку (1) закрепляют на стержне, который с помощью ручки (2), вставленной в просвет внешнего цилиндра (3), свободно поднимают и опускают в цилиндре. Высота падения чашки = 7,5 см. Если после трех падений обе части почвы в чашке начнут сливаться так, что заполняют щель между ними на высоту 1 мм и длину 1,5—2 см, то данное увлажнение соответствует нижнему пределу текучести. В случае отсутствия слияния к почве добавляют немного воды и повторяют те же операции. При избытке воды сливание почвенной массы отмечают уже после первого или второго удара, тогда в исследуемый образец добавляют немного сухой почвы или подсушивают почвенную пасту на воздухе и продолжают испытание. Когда требуемая консистенция почвы достигнута, из чашки в сушильный стаканчик отбирают навеску почвы в 10—15 г и определяют в ней содержание воды, которое и соответствует верхнему пределу пластичности. Запись при определении влажности производят по форме табл. 27.

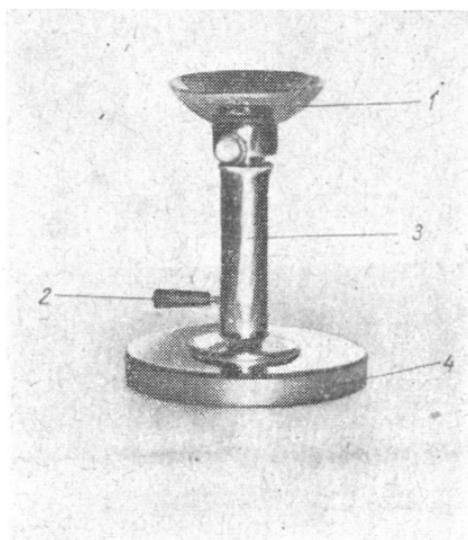


Рис. 112. Прибор для определения нижней границы текучести:  
1 — металлическая чашка, 2 — ручка, 3 — полый цилиндр, 4 — основание прибора

Определение нижней границы текучести балансирующим конусом Васильева. Полированный металлический конус (1) (рис. 113) изготовляют из нержавеющей стали с углом при вершине в  $30^\circ$  и высотой 25 мм. На высоте 10 мм от вершины конуса нанесена круговая метка. При основании конуса смонтировано балансирующее устройство, состоящее из двух металлических шаров (2), укрепленных на концах стальной проволоки, согнутой в полуокружность. Центр основания конуса имеет ручку (3). Для прибора изготовляют деревянную подставку (4), в которую вставляют металлический стаканчик (5), диаметром 4 см и высотой 2 см. В стаканчик загружают почву или грунт, замешанные с водой до рабочего состояния. Поверхность их тщательно заглаживают, на нее устанавливают конус, смазанный слоем вазелина. Под влиянием собственного веса конус погружается в почву. Погружение его на глубину 10 мм (до метки) свидетельствует о том, что запас влаги в почве соответствует нижнему пределу текучести или верхнему пределу пластичности. Если глубина погружения конуса меньше 10 мм, в почву добавляют воды; больше — прибавляют сухую почву или подсушивают

образец почвы, добываясь такой влажности, при которой глубина погружения конуса под собственным весом равна 10 мм. После этого отбирают в сушильный стаканчик пробу почвы и определяют ее влажность, как описано выше. Повторность определения 2–3-кратная.

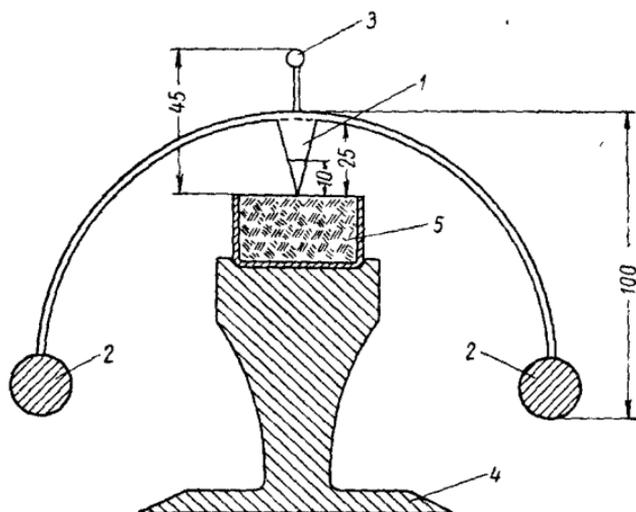


Рис. 113. Балансирный конус Васильева:

1 — конус, 2 — балансирное устройство, 3 — ручка, 4 — деревянная подставка, 5 — стакан для почвы

**Определение нижней границы пластичности.** Для многих почв и грунтов нижняя граница пластичности или граница скатывания почвы в шнур соответствует, примерно, максимальной молекулярной влагоемкости, определяемой методом пленочного равновесия по Лебедеву. Определение границы скатывания довольно примитивно, производят его следующим образом: почвенную массу после определения верхней границы пластичности подсушивают или в нее добавляют сухую почву. Затем из почвенной массы скатывают шарик диаметром в 1 см и раскатывают его на бумаге в шнур толщиной — 3 мм. После потери избытка влаги почвенный шнур распадается на мелкие кусочки, которые собирают в сушильный стаканчик. Набрав 5–10 г крошек почвы, определяют ее влажность. Повторность определения 2–3-кратная. Из данных всех определений выводят среднее значение влажности, соответствующей нижней границе текучести. Число пластичности равно разнице содержания влажности при нижней границе текучести и границе раскатывания в шнур. Пусть установлено, что влажность нижней границы текучести равна 36%, границы скатывания — 18%. Тогда число пластичности =  $36 - 18 = 18\%$ .

В лаборатории коллоидной химии МГУ разработана конструкция пластомера (пластомер Ребиндера), используемого

для характеристики структурно-механических свойств, в частности, пластичности вязких систем.

Пластомер (рис. 114) имеет массивный штатив с площадкой наверху, на которую опирается с помощью призмы диск (4) — легкий подвижный блок с незначительным трением. Через диск перекинута нить, на одном конце которой подвешен стержень с делениями (2) и навинчивающимся на него массивным конусом (1), на другом — противовес (3) с разновесом. Вес конуса уравновешен противовесом. Образец исследуемого материала в виде пасты загружают в сосуд, находящийся на площадке, свободно передвигающейся по вертикали. Выравнивая поверхность пасты, вершину конуса приводят в соприкосновение с ней.

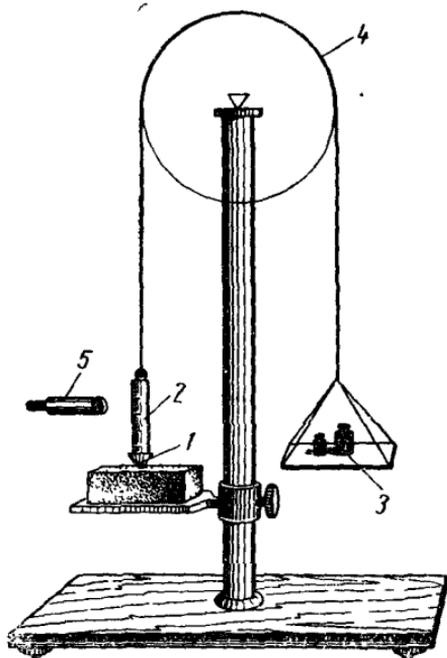


Рис. 114. Пластомер Ребиндера:

1 — конус, 2 — стержень деления 3 — площадка для груза, 4 — диск, 5 — микроскоп

Удаляя груз (гирьки) с правой площадки, погружают конус в образец. С помощью микроскопа (5) наблюдают погружение конуса до полной остановки. Глубину погружения определяют по микрошкале — 2 с точностью до 0,01 мм под действием постоянной нагрузки —  $Q$ .

Изучают кинетику скорости погружения конуса в зависимости от напряжения сдвига  $P$ , величина которого зависит от пластичного состояния материала. По мере углубления конуса скорость погружения уменьшается вследствие увеличения площадки контакта и при максимальной глубине  $h$  под действием груза  $Q$  скорость погружения практически равна нулю.

При погружении конуса происходит течение слоя почвенной массы вдоль боковой поверхности его. Напряжение  $P$  в кг или г, вызывающее это течение, определяют проекцией действующей на конус силы —  $Q'$  на образующую конуса —  $l$ , отнесенной к единице площади соприкосновения конуса с изучаемой системой  $S \text{ см}^2$ .

Для расчета используют формулу:

$$P = k_a \frac{Q}{h^2}, \quad (122)$$

где  $Q$  — вес гири;

$h$  — глубина погружения конуса;

$k_\alpha$  — константа  $= \frac{1}{\pi} \cos^2 \alpha$ , где  $\alpha$  — угол при вершине конуса. При углах  $\alpha$ , равных 30, 45 и 90°, константа конуса  $k_{30} = 1,108$ ;  $k_{45} = 0,658$ ;  $k_{90} = 0,159$ .

Показания пластомера дают косвенную характеристику пластического состояния вязких материалов.

### Расчеты удельного сопротивления и тяговых усилий по твердости почв

Определение удельного сопротивления при обработке по твердости почвы. Удельным сопротивлением почвы при обработке называют тяговое усилие, затрачиваемое на подрезание одного  $см^2$  поперечного сечения пласта и выражают его в  $кг/см^2$ .

Тяговые усилия при вспашке расходуют на преодоление сопротивления трения, на деформацию почвы — растяжение, сжатие, сдвиг, кручение и отбрасывание пласта в сторону.

Определяют его обычно с помощью динамометров, которые помещают между плугом и трактором. В качестве динамометра используют динамометрическую тележку или работомер, физико-агрономического института (1956). Динамометрирование — сложный и трудоемкий процесс, поэтому исследовательская мысль была направлена на упрощение определения удельного сопротивления, в частности, на использование физико-механических характеристик для этих целей.

Горячкин (1923) впервые силу тяги плуга выразил формулой:

$$P = fg + k_{ав} + \varepsilon_{ав}v^2, \quad (123)$$

где  $g$  — вес плуга,  $f$  — коэффициент трения,  $k$  — коэффициент деформации почвы на единицу площади поперечного сечения пласта,  $a$  — глубина пахоты,  $b$  — ширина захвата плуга,  $v$  — скорость хода в  $м/сек$ ,  $\varepsilon$  — коэффициент изменения живой силы частицы. Формула, в основном, соответствует технологии при обработке почвы.

Качинский (1939), установив высокую коррелятивную зависимость между твердостью почвы и удельным сопротивлением при вспашке, предложил формулу:

$$P = P_1 + R_x \cdot (a - b), \quad (124)$$

где  $P$  — искомое удельное сопротивление почвы,  $P_1$  — среднее удельное сопротивление, найденное динамометрированием,  $R_x$  — коэффициент регрессии, показывающий изменение удельного сопротивления почвы при изменении ее твердости на единицу;  $b$  — среднее сопротивление почвы расклиниванию в  $кг/см^2$ ,  $a$  — сопротивление почвы расклиниванию на глубину вспашки в момент определения.

При расчетах необходимы средние значения удельного сопро-

тивления почвы, ее твердости, определенной твердомером соответствующей конструкции и коэффициента регрессии, что при культурной эксплуатации земли должно быть установлено для каждого почвенного типа раз и надолго.

Щучкин (1937) предложил формулу для теоретического расчета тягового сопротивления почвы при обработке.

$$P = fg + mB_{cp} \cdot ab, \quad (125)$$

которая является дальнейшим развитием формулы Горячкина.  $P$  — тяговое сопротивление плуга в кг,  $f$  — коэффициент трения почвы о сталь;  $g$  — вес плуга в кг;  $m$  — соотношение между удельным сопротивлением и твердостью почвы, в среднем, для большинства почв равно 0,014 при отсутствии прилипания почвы к рабочим частям плуга,  $B_{cp}$  — средняя твердость пахотного слоя,  $a$  — глубина,  $b$  — ширина захвата плуга в см. Формула Щучкина интересна тем, что она, подобно формуле Горячкина, включает характеристику плуга и пласта.

**Расчет тяговых сопротивлений комбайнов по твердости почв.** При изучении тяговых усилий при перекачивании комбайнов нами установлен (1940, 1954) высокий и достоверный коэффициент корреляции между твердостью почвы и тяговым сопротивлением комбайнов, которое определили динамометрически. Предложена эмпирическая формула для вычисления тягового сопротивления комбайна «Сталинец-1» с полным бункером:

$$P_1 = P_0 + R_x(B_0 - B_x), \quad (126)$$

где  $P_x$  — искомое тяговое сопротивление комбайна,  $P_0$  — наименьшее тяговое сопротивление комбайна при перекачивании его по твердой поверхности почвы на целине,  $R_x$  — коэффициент регрессии тягового сопротивления по твердости почвы данного типа,  $B_0$  — твердость целинной почвы в слое 0—12 см (глубина, на которой наиболее резко сказывается деформирующее действие колес комбайнов),  $B_x$  — твердость почвы в момент определения тягового сопротивления комбайна, установленная твердомером Горячкина или ВИСХОМа.

Пример вычисления: при перекачивании по твердой поверхности установлено  $P_0 = 725$  кг,  $B_0 = 40$  кг/см<sup>2</sup>, коэффициент регрессии тягового сопротивления по твердости почвы  $R_x = 6,5$ ,  $B_x = 20$  кг/см<sup>2</sup> установлен твердомером в момент определения  $P$ . Отсюда  $P = 725 + 6,5(40 - 20) = 855$  кг.

Естественно, что  $P_0$  и  $B_0$ , а также  $R_x$  должны быть заранее определены для данного комбайна, твердомера и типа почвы, вместо  $P_0$  и  $B_0$  можно использовать средние арифметические значения их для почв данного типа.

Г. А. Николаев разработал метод расчета  $P_x$  с помощью твердомера Горячкина для общего случая, т. е. любого комбайна

с металлическими колесами и при разной загрузке бункера, а также любой почвы:

$$P_x = 0,86 \sqrt{\frac{4Q}{C_n D^2 B}}, \quad (127)$$

где  $P_x$  — искомое тяговое сопротивление комбайна;  $Q$  — нагрузка на колесо комбайна;  $C_n$  — коэффициент объемного сжатия по твердомеру Горячкина;  $D$  — диаметр колеса комбайна;  $B$  — ширина обода колеса.

При вычислении тяговых усилий при перекачивании машин часто учитывают глубину колеи колес, исходя из формулы:

$$P_x = \frac{5}{6} \sqrt{\frac{h}{D}} \cdot Q. \quad (128)$$

Здесь  $P_x$  — искомое тяговое сопротивление;  $h$  — глубина колеи;  $D$  — диаметр колеса,  $Q$  — нагрузка на колесо.

Приведенные формулы свидетельствуют о том, что между удельным сопротивлением почвы обработке и тяговым сопротивлением комбайна, с одной стороны, и твердостью почвы, с другой, — существуют количественные соотношения, которые дают возможность установить тяговые усилия и потребность в горючем сельскохозяйственных машин с помощью простых приборов — твердомеров.

---

## ЛИТЕРАТУРА

- Антипов-Каратаев И. Н., Келлерман В. В., Хан Д. В. О почвенном агрегате и методах его исследования. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1948.
- Астапов С. В. Мелиоративное почвоведение (практикум). Сельхозгиз, М., 1958.
- Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. Гидрометеоздат, Л., 1948.
- Долгов С. И. Исследование подвижности почвенной влаги и ее доступности для растения. Изд-во АН СССР, 1948.
- Васильев А. М. Исследование физических свойств почвы. Кишинев, 1954.
- Высоцкий А. А. Динамометрирование сельскохозяйственных машин. Машгиз, М., 1949.
- Дояренко А. Г. Избранные работы и статьи, т. I, 1926.
- Еремينا Б. Г. Газовый анализ. Госхимиздат, 1955.
- Качинский Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, 1958.
- Качинский Н. А., Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Опыт агрофизической характеристики почв на примере Центрального Урала. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1950.
- Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды. Изд. 4-е. М.—Л., 1936.
- Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов, сб. 2. Изд-во АН СССР, 1954.
- Основы агрофизики. Под ред. акад. Иоффе А. Ф. и Реута И. Б. Физматгиз, М., 1959.
- Попов М. П. Термометрия и калориметрия. Изд-во МГУ, 1954.
- Роде А. А. Почвенная влага. Изд-во АН СССР, М., 1952.
- Труды почвенного института им. Докучаева, т. XV, 1954.
- Урываев В. А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Гидрометеоздат, 1953.
- «Ученые записки МГУ», вып. 44-й, 1940.
- Фигуровский А. А. Седиментометрический анализ. Изд-во АН СССР, 1948.
- Чудновский А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах. Гостехиздат, М., 1954.
- Baver L. D. Soil physics. Second edition, New York, 1948.
- Janert H. Bodenkundliches Practicum. Berlin, 1953.
- Raymond F., Dawson. Laboratory manual in soil mechanics. New York -- London, 1949.
- Russell M. B. A simplified air — picnometer for field use. Soil sci. soc Am. Proc., v. 14, 1949.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Скорости ладения частиц шарообразной формы по Стоксу в воде в зависимости от температуры и удельного веса твердой фазы почвы

Диаметр частиц в мм	Удельный вес частиц	Глубина взятия проб в см	Температура							
			12,5°	15°	17,5°	20°	22,5°	25°	27,5°	30°
0,05	2,40	25	1,571	1,676	1,786	1,896	2,014	2,131	2,258	2,384
0,01	—	10	0,06285	0,06705	0,07145	0,07584	0,08055	0,08525	0,09032	0,09538
0,005	—	10	0,01571	0,01676	0,01786	0,01896	0,02014	0,02131	0,02258	0,02384
0,001	—	7	0,0006285	0,0006705	0,0007145	0,0007584	0,0008055	0,0008525	0,0009032	0,0009538
0,05	2,45	25	1,628	1,736	1,850	1,964	2,086	2,207	2,339	2,470
0,01	—	10	0,06509	0,06944	0,07400	0,07855	0,08343	0,08830	0,09354	0,09878
0,005	—	10	0,01628	0,01736	0,01850	0,01964	0,02086	0,02207	0,02339	0,02470
0,001	—	7	0,0006509	0,0006944	0,0007400	0,0007855	0,0008343	0,0008830	0,0009354	0,0009878
0,05	2,50	25	1,684	1,796	1,914	2,032	2,158	2,284	2,420	2,555
0,01	—	10	0,06734	0,07184	0,07655	0,08126	0,08630	0,09134	0,09677	0,10219
0,005	—	10	0,01684	0,01796	0,01914	0,02032	0,02158	0,02284	0,02420	0,02555
0,001	—	7	0,0006734	0,0007184	0,0007655	0,0008126	0,0008630	0,0009134	0,0009677	0,0010219
0,05	2,55	25	1,740	1,856	1,978	2,099	2,230	2,360	2,500	2,640
0,01	—	10	0,06958	0,07423	0,07910	0,08397	0,08918	0,09439	0,09999	0,10559
0,005	—	10	0,01740	0,01856	0,01978	0,02099	0,02230	0,02360	0,02500	0,02640
0,001	—	7	0,0006958	0,0007423	0,0007910	0,0008397	0,0008918	0,0009439	0,0009999	0,0010559
0,05	2,60	25	1,796	1,916	2,042	2,167	2,302	2,436	2,581	2,725

Диаметр частич в мм	Удель- ный вес частич	Глубина взятия проб в см	Температура								
			12,5°	15°	17,5°	20°	22,5°	25°	27,5°	30°	
0,01	—	10	0,07183	0,07663	0,08166	0,08668	0,09206	0,09743	0,10322	0,10900	
0,005	—	10	0,01796	0,01916	0,02042	0,02167	0,02302	0,02436	0,02581	0,02725	
0,001	—	7	0,0007183	0,0007663	0,0008166	0,0008668	0,0009206	0,0009743	0,0010322	0,0010900	
0,05	2,65	25	1,852	1,976	2,106	2,235	2,374	2,512	2,661	2,810	
0,01	—	10	0,07407	0,07902	0,08421	0,08939	0,09493	0,10047	0,10644	0,11241	
0,005	—	10	0,01852	0,01976	0,02106	0,02235	0,02374	0,02512	0,02661	0,02810	
0,001	—	7	0,0007407	0,0007902	0,0008421	0,0008939	0,0009493	0,0010047	0,0010644	0,0011241	
0,05	2,70	25	1,908	2,035	2,169	2,302	2,445	2,588	2,742	2,895	
0,01	—	10	0,07631	0,08141	0,08676	0,09210	0,09781	0,10352	0,10967	0,11581	
0,005	—	10	0,01908	0,02035	0,02169	0,02302	0,02445	0,02588	0,02742	0,02895	
0,001	—	7	0,0007631	0,0008141	0,0008676	0,0009210	0,0009781	0,0010352	0,0010967	0,0011581	
0,05	2,75	25	1,964	2,095	2,233	2,370	2,517	2,664	2,822	2,980	
0,01	—	10	0,07856	0,08381	0,08931	0,09481	0,10069	0,10656	0,11289	0,11922	
0,005	—	10	0,01964	0,02095	0,02233	0,02370	0,02517	0,02664	0,02822	0,02980	
0,001	—	7	0,0007856	0,0008381	0,0008931	0,0009481	0,0010069	0,0010656	0,0011289	0,0011922	
0,05	2,80	25	2,020	2,155	2,297	2,438	2,589	2,740	2,903	3,066	
0,01	—	10	0,08080	0,08620	0,09186	0,09751	0,10356	0,10961	0,11612	0,12263	
0,005	—	10	0,02020	0,02155	0,02297	0,02438	0,02589	0,02740	0,02903	0,03066	
0,001	—	7	0,0008080	0,0008620	0,0009186	0,0009751	0,0010356	0,0010961	0,0011612	0,0012263	

Таблица 2  
Плотность и вязкость воды

Температура в °С	Плотность воды	Вязкость воды
10	0,999727	0,01301
12,5	0,999466	0,01219
15	0,999126	0,01138
17,5	0,998713	0,01072
20	0,998230	0,01006
22,5	0,997682	0,009504
25	0,997071	0,008948
27,5	0,996400	0,008473
30	0,995673	0,007998

Таблица 3

Приведение объема газа к нормальным условиям

Если объем измеренного газа равен  $v$  при  $t^\circ$  и давлении  $P$ , то объем его  $v_0$  при  $0^\circ$  и 760 мм вычисляется по формуле:

$$v_0 = v \frac{P}{760 (1 + 0,00367 t^\circ)}$$

В таблице даны значения выражения  $(1 + 0,00367 t)$  и логарифм этого числа в интервале температур от 15 до  $30^\circ$ .

$t^\circ$	$1 + 0,00367 t$	$\lg \frac{1}{1 + 0,00367 t}$	$t^\circ$	$1 + 0,00367 t$	$\lg \frac{1}{1 + 0,00367 t}$
15,0	1,05505	97673	17,0	06239	97372
15,1	05542	9,97657—10	17,1	06276	9,97357—10
15,2	05578	97642	17,2	06312	97342
15,3	05615	97627	17,3	06349	97327
15,4	05652	97612	17,4	06386	97312
15,5	05689	97597	17,5	06423	97297
15,6	05725	97582	17,6	1,06459	9,97282
15,7	05762	97567	17,7	06496	97267
15,8	05799	97552	17,8	06533	97252
15,9	05835	97537	18,0	06606	97222
16,0	05872	97522	18,1	06643	9,97207—10
16,1	05909	9,97507—10	18,2	06679	97192
16,2	05945	97492	18,3	06716	97177
16,3	05982	97477	18,4	06753	97162
16,4	06019	97462	18,5	06790	97147
16,5	06056	97447	18,6	06826	97132
16,6	06092	97432	18,7	06863	97117
16,7	06129	97417	18,8	06900	97102
16,8	06166	97402	19,0	06973	97073

$t^\circ$	$1 + 0,00367 t$	$\lg \frac{1}{1 + 0,00367 t}$	$t^\circ$	$1 + 0,00367 t$	$\lg \frac{1}{1 + 0,00367 t}$
19,1	07010	9,97058—10	24,3	08918	96290
19,2	07046	97043	24,4	08955	96275
19,3	07083	97028	24,5	08992	96261
19,4	07120	97013	24,6	09028	96246
19,5	07157	96998	24,7	09065	96231
19,6	07193	96983	24,8	09102	96217
19,7	07230	96968	25,0	09175	96188
19,8	07267	96954	25,1	09212	9,96173—10
19,9	07303	96939	25,2	09248	96159
20,0	07340	96924	25,3	09285	96144
20,1	07377	9,96909—10	25,4	09322	96129
20,2	07413	96894	25,5	09359	96115
20,3	1,07450	9,96879	25,6	09395	96100
20,4	07487	96864	25,7	09432	96086
20,5	07524	96850	25,8	1,09469	9,96071
20,6	07560	96835	26,0	09542	96042
20,7	07597	96820	26,1	09579	9,96027—10
20,8	07634	96805	26,2	09615	96013
20,9	07670	96791	26,3	09652	95998
21,0	07707	96776	26,4	09689	95984
21,1	07744	9,96761—10	26,5	09726	95969
21,2	07780	96746	26,6	09762	95955
21,3	07817	96731	26,7	09799	95940
21,4	07854	96716	26,8	09836	95925
21,5	07891	96702	27,0	09909	95897
21,6	07927	96687	27,1	09946	9,95882—10
21,7	07964	96672	27,2	09982	95868
21,8	08001	96657	27,3	10019	95853
21,9	08037	96643	27,4	10056	95839
22,0	08074	96628	27,5	10093	95824
22,1	08111	9,96633—10	27,6	10129	95810
22,2	08147	96598	27,7	10166	95795
22,3	08184	96584	27,8	1,10203	9,95781
22,4	08221	96569	28,0	10276	95752
22,5	08258	96554	28,1	10313	9,95737—10
22,6	08294	96539	28,2	10349	95723
22,7	08331	96525	28,3	10386	95709
22,8	08368	96510	28,4	10423	95694
22,9	08404	96495	28,5	10460	95679
23,0	1,08441	9,96481	28,6	10496	95665
23,1	08478	9,96466—10	28,7	10533	95651
23,2	08514	96451	28,8	10570	95636
23,3	08551	96437	29,0	10643	95608
23,4	08588	96422	29,1	10680	9,95593—10
23,5	08625	96407	29,2	10716	95579
23,6	08661	96393	29,3	10753	95565
23,7	08698	96378	29,4	10790	95550
23,8	08735	96363	29,5	10827	95535
23,9	08771	96349	29,6	10863	95521
24,0	08808	96334	29,7	10900	95507
24,1	08845	9,96319—10	29,8	10937	95492
24,2	08881	96305	30,0	11010	95464

Давление насыщенного пара воды и содержание влаги

Температура °C	Давление пара мм рт. ст. (m)	Содержание влаги в газе г/м³	Температура °C	Давление пара мм рт. ст. (m)	Содержание влаги в газе г/м³	Температура °C	Давление пара мм рт. ст. (m)	Содержание влаги в газе г/м³
5	6,543	6,82	24	22,377	21,68	43	64,80	59,09
6	7,013	7,28	25	23,756	22,93	44	68,26	62,05
7	7,513	7,76	26	25,209	24,24	45	71,88	65,14
8	8,045	8,28	27	26,739	25,64	46	75,65	68,36
9	8,609	8,82	28	28,349	27,09	47	70,60	71,73
10	9,209	9,39	29	30,043	28,62	48	83,71	75,22
11	9,844	10,01	30	31,824	30,21	49	88,02	78,86
12	10,518	10,64	31	33,695	31,89	50	92,51	82,63
13	11,231	11,32	32	35,663	33,64	51	79,20	—
14	11,987	12,03	33	37,729	35,48	52	102,09	—
15	12,788	12,82	34	39,898	37,40	53	107,20	—
16	13,634	13,59	35	42,175	39,41	54	112,51	—
17	14,530	14,43	36	44,563	41,51	55	118,04	—
18	15,477	15,31	37	47,057	43,71	56	123,80	—
19	16,477	16,25	38	49,642	46,50	57	120,82	—
20	17,535	17,22	39	52,442	48,40	58	136,08	—
21	18,650	18,25	40	55,324	50,91	59	142,60	—
22	19,827	19,33	41	58,34	53,52	60	149,38	—
23	21,068	20,48	42	61,50	56,25			

## в воздухе (при разных температурах)

Отрицательная температура °С	Давление пара в мм рт. ст. (m)	Содержание влаги в газе в г/м <sup>3</sup>	Отрицательная температура °С	Давление пара в мм рт. ст. (m)	Содержание влаги в газе в г/м <sup>3</sup>	Отрицательная температура °С	Давление пара в мм рт. ст. (m)	Содержание влаги в газе в г/м <sup>3</sup>
0	4,217	4285	21	0,705	770	42	0,0768	91,7
1	3,880	3955	22	0,640	705	43	0,0684	82,0
2	4,579	4625	23	0,580	640	44	0,0609	73,0
3	3,568	3655	24	0,526	585	45	0,0541	65,5
4	3,280	3065	25	0,476	530	46	0,481	58,7
5	3,013	3085	26	0,430	480	47	0,426	52,0
6	2,765	2860	27	0,380	436	48	0,378	46,4
7	2,537	2630	28	0,351	395	49	0,0334	41,0
8	2,326	2420	29	0,317	358	50	0,0295	36,5
9	2,131	2220	30	0,286	324	51	0,0261	32,5
10	1,950	2042	31	0,2575	294	52	0,0230	28,7
11	1,785	1878	32	0,2318	265	53	0,0203	25,4
12	1,632	1726	33	0,2084	240	54	0,0178	22,5
13	1,490	1584	34	0,1873	217	55	0,0157	19,6
14	1,361	1447	35	0,1681	195	56	0,0138	17,8
15	1,241	1330	36	0,1507	175	57	0,0121	15,5
16	1,132	1215	37	0,1351	158	58	0,0106	13,6
17	1,031	1110	38	0,1209	142	59	0,00925	12,0
18	0,937	1015	39	0,1081	127	60	0,00808	10,5
19	0,854	926	40	0,0966	114			
20	0,776	847	41	0,0862	102,5			

## Растворимость газов в воде при разных температурах

$t^{\circ}$	Воздух $a^1$	Азот $a$	Водород $a$	Кислород $a$	Углекислый газ $a$	Аммиак $a$	Сероводород $a$	Метан $a$
5	0,02547	0,02086	0,02044	0,04287	1,424	$t^{\circ}=0,1299$	3,977	0,04805
10	0,02268	0,01861	0,01955	0,03802	1,194	910	3,329	0,04177
15	0,02048	0,01685	0,01883	0,03415	1,019	802	2,945	0,03690
20	0,01871	0,01545	0,01819	0,03103	0,878	711	2,582	0,03308
25	0,01727	0,01434	0,01754	0,02831	0,759	635	2,282	0,03006
30	0,01607	0,01342	0,01699	0,02608	0,665	—	2,037	0,02762
35	0,01504	0,01256	0,01666	0,02440	0,592	—	1,831	0,02546
40	0,01415	0,01181	0,01644	0,02306	0,530	—	1,660	0,02369
45	0,01352	0,01130	0,01624	0,02187	0,479	—	1,516	0,02238
50	0,01298	0,01088	0,01608	0,02090	0,436	—	1,392	0,02134
60	0,01216	0,01023	0,01600	0,01946	0,359	—	1,190	0,01954

<sup>1</sup>  $a$  — объем газа (приведенный к  $0^{\circ}\text{C}$  и 760 мм рт. ст.), растворенного в единице объема воды, при парциальном давлении газа = 760 мм рт. ст.

Таблица 6

## Растворимость некоторых газов

Растворитель при $t^{\circ}$	Концентрация в г/л	Кислород $a$	Углекислота $a$
$\text{H}_2\text{SO}_4$ при $20^{\circ}$	240	0,0195	0,665
	436	0,0155	—
	~ 1750	0,0275	0,926
$\text{NaCl}$ при $15^{\circ}$	58	0,0231	
	116	0,0170	
	174	0,0117	
	315	0,0540	

## Шкала показателей преломления растворов сахарозы при 20°С

Показатель преломления при 20°С	Процент сахарозы	Показатель преломления при 20°С	Процент сахарозы	Показатель преломления при 20°С	Процент сахарозы
1,3344	1,0	1,3421	6,4	1,3488	10,8
1,3345	1,1	1,3423	6,5	1,3489	10,9
1,3347	1,2	1,3424	6,6	1,3491	11,0
1,3348	1,3	1,3426	6,7	1,3492	11,1
1,3350	1,4	1,3427	6,8	1,3494	11,2
1,3351	1,5	1,3429	6,9	1,3496	11,3
1,3352	1,6	1,3430	7,0	1,3497	11,4
1,3354	1,7	1,3432	7,1	1,3499	11,5
1,3355	1,8	1,3433	7,2	1,3500	11,6
1,3357	1,9	1,3435	7,3	1,3502	11,7
1,3358	2,0	1,3436	7,4	1,3503	11,8
1,3359	2,1	1,3438	7,5	1,3505	11,9
1,3361	2,2	1,3439	7,6	1,3507	12,0
1,3362	2,3	1,3441	7,7	1,3508	12,1
1,3364	2,4	1,3457	8,8	1,3510	12,2
1,3365	2,5	1,3459	8,9	1,3511	12,3
1,3380	3,6	1,3460	9,0	1,3513	12,4
1,3382	3,7	1,3462	9,1	1,3515	12,5
1,3383	3,8	1,3463	9,2	1,3516	12,6
1,3385	3,9	1,3465	9,3	1,3518	12,7
1,3386	4,0	1,3466	9,4	1,3519	12,8
1,3387	4,1	1,3468	9,5	1,3521	12,9
1,3389	4,2	1,3469	9,6	1,3522	13,0
1,3390	4,3	1,3471	9,7	1,3522	13,0
1,3392	4,4	1,3472	9,8	1,3524	13,1
1,3393	4,5	1,3474	9,9	1,3526	13,2
1,3394	4,6	1,3475	10,0	1,3527	13,3
1,3396	4,7	1,3477	10,1	1,3529	13,4
1,3397	4,8	1,3478	10,2	1,3530	13,5
1,3399	4,9	1,3480	10,3	1,3532	13,6
1,3400	5,0	1,3481	10,4	1,3533	13,7
1,3402	5,1	1,3483	10,5	1,3535	13,8
1,3418	6,2	1,3484	10,6	1,3537	13,9
1,3420	6,3	1,3486	10,7	1,3538	14,0

Показатель преломления при 20°С	Процент сахарозы	Показатель преломления при 20°С	Процент сахарозы	Показатель преломления при 20°С	Процент сахарозы
1,3714	24,6	1,3744	26,3	1,3774	28,0
1,3716	24,7	1,3746	26,4	1,3776	28,1
1,3718	24,8	1,3748	26,5	1,3778	28,2
1,3719	24,9	1,3749	26,6	1,3780	28,3
1,3721	25,0	1,3751	26,7	1,3782	28,4
1,3723	25,1	1,3753	26,8	1,3783	28,5
1,3725	25,2	1,3755	26,9	1,3785	28,6
1,3726	25,3	1,3757	27,0	1,3787	28,7
1,3728	25,4	1,3758	27,1	1,3789	28,8
1,3730	25,5	1,3760	27,2	1,3790	28,9
1,3732	25,6	1,3762	27,3	1,3792	29,0
1,3733	25,7	1,3764	27,4	1,3794	29,1
1,3735	25,8	1,3766	27,5	1,3796	29,2
1,3737	25,9	1,3767	27,6	1,3798	29,3
1,3739	26,0	1,3769	27,7	1,3799	29,4
1,3741	26,1	1,3771	27,8	1,8801	29,5
1,3742	26,3	1,3773	27,9		

Таблица 8

## Поправки к показаниям рефрактометра при разных температурах

Температура в °С	Процент сухих веществ в продукте								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
10*	0,50	0,54	0,58	0,60	0,64	0,66	0,68	0,70	0,72
11	0,46	0,49	0,53	0,55	0,58	0,60	0,62	0,64	0,65
12	0,42	0,45	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,57	0,58
13	0,37	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,49	0,50	0,51
14	0,33	0,35	0,37	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44
15	0,27	0,29	0,31	0,33	0,34	0,34	0,35	0,36	0,37
16	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30
17	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22
18	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15
19	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08

От найденного содержания сухих веществ надо отнять

10*	0,50	0,54	0,58	0,60	0,64	0,66	0,68	0,70	0,72
11	0,46	0,49	0,53	0,55	0,58	0,60	0,62	0,64	0,65
12	0,42	0,45	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,57	0,58
13	0,37	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,49	0,50	0,51
14	0,33	0,35	0,37	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44
15	0,27	0,29	0,31	0,33	0,34	0,34	0,35	0,36	0,37
16	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30
17	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22
18	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15
19	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08

Показатель преломления при 20°C	Процент сахарозы	Показатель преломления при 20°C	Процент сахарозы	Показатель преломления при 20°C	Процент сахарозы
1,3540	14,1	1,3597	17,6	1,3655	1,1
1,3541	14,2	1,3599	17,7	1,3657	21,2
1,3543	14,3	1,3600	17,8	1,3659	21,3
1,3545	14,4	1,3602	17,9	1,3661	21,4
1,3546	14,5	1,3604	18,0	1,3662	21,5
1,3548	14,6	1,3605	18,1	1,3664	21,6
1,3549	14,7	1,3607	18,2	1,3666	21,7
1,3551	14,8	1,3609	18,3	1,3667	21,8
1,3552	14,9	1,3610	18,4	1,3669	21,9
1,3554	15,0	1,3612	18,5	1,3671	22,0
1,3556	15,1	1,3614	18,6	1,3672	22,1
1,3557	15,2	1,3615	18,7	1,3674	22,2
1,3559	15,3	1,3617	18,8	1,3676	22,3
1,3561	15,4	1,3619	18,9	1,3677	22,4
1,3562	15,5	1,3620	19,0	1,3679	22,5
1,3564	15,6	1,3622	19,1	1,3681	22,6
1,3566	15,7	1,3624	19,2	1,3682	22,7
1,3567	15,8	1,3625	19,3	1,3684	22,8
1,3569	15,9	1,3627	19,4	1,3686	22,9
1,3571	16,0	1,3629	19,5	1,3687	23,0
1,3572	16,1	1,3630	19,6	1,3689	23,1
1,3574	16,2	1,3632	19,7	1,3691	23,2
1,3576	16,3	1,3634	19,8	1,3692	23,3
1,3577	16,4	1,3635	19,9	1,3694	23,4
1,3579	16,5	1,3637	20,0	1,3696	23,5
1,3581	16,6	1,3639	20,1	1,3697	23,6
1,3582	16,7	1,3640	20,2	1,3699	23,7
1,3584	16,8	1,3642	20,3	1,3701	23,8
1,3586	16,9	1,3644	20,4	1,3703	23,9
1,3587	17,0	1,3645	20,5	1,3704	24,0
1,3589	17,1	1,3647	20,6	1,3706	24,1
1,3591	17,2	1,3649	20,7	1,3708	24,2
1,3592	17,3	1,3650	20,8	1,3709	24,3
1,3594	17,4	1,3652	20,9	1,3711	24,4
1,3596	17,5	1,3654	21,0	1,3713	24,5

Температура в °С	Процент сухих веществ в продукте								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40

К найденному содержанию сухих веществ надо прибавить

21	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08
22	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
23	0,19	0,20	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23
24	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31
25	0,33	0,35	0,36	0,37	0,38	0,38	0,39	0,40	0,40
26	0,40	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,48
27	0,48	0,50	0,52	0,53	0,54	0,55	0,55	0,56	0,56
28	0,56	0,57	0,60	0,61	0,62	0,63	0,63	0,64	0,64
29	0,64	0,66	0,68	0,69	0,71	0,72	0,73	0,73	0,73
30	0,72	0,74	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,81	0,81

\* До температуры 19° включительно.

Расчет гидрологических характеристик почвы в разных измерениях

Глубина в см	Удельный вес скелета почвы	Вес слоя почвы в м/га	Гигроскопическая влажность			Максимальная гигроскопическая влажность			Влажность завя- дания			Влагоемкость			Диапазон активной влаги		
			%	мм	м <sup>3</sup> /га	%	мм	м <sup>3</sup> /га	%	мм	м <sup>3</sup> /га	%	мм	м <sup>3</sup> /га	%	мм	м <sup>3</sup> /га
0—10	1,21	1210	3,86	4,67	46,7	7,82	9,46	94,60	11,73	14,19	141,9	31,0	37,51	375,10	19,27	23,32	233,20
10—20	1,24	1240	4,18	5,18	51,8	8,49	10,53	105,3	12,73	15,79	157,90	29,0	35,96	359,60	16,23	20,17	201,70
20—30	1,25	1250	4,42	5,52	55,2	9,08	11,35	113,50	13,62	17,02	170,2	26,3	32,87	328,70	12,68	15,85	158,50
30—40	1,36	1360	4,12	5,60	56,0	9,15	12,44	124,4	13,72	18,66	186,6	23,7	32,23	322,30	9,98	13,57	135,70
40—50	1,38	1380	3,95	5,45	54,5	8,66	11,95	119,5	12,99	17,92	179,2	20,9	28,84	288,40	7,91	10,92	109,20
0—50	—	6440	—	26,42	264,20	—	55,73	557,30	—	87,58	875,80	—	167,41	1674,10	—	79,83	798,3
50—60	1,45	1450	3,54	5,13	51,3	8,18	11,86	118,60	12,27	17,79	177,90	19,6	28,42	284,20	7,33	10,63	106,30
60—70	1,45	1450	3,45	5,00	50,0	7,93	11,50	115,0	11,89	17,25	172,50	18,7	27,11	271,10	6,81	9,86	98,6
80—80	1,47	1470	3,44	5,06	50,6	7,69	11,30	113,0	11,53	16,95	169,50	17,0	24,99	249,90	5,47	8,04	80,4
70—90	1,47	1470	3,52	5,17	51,70	7,61	11,18	111,80	11,42	16,77	167,70	17,0	24,99	249,90	5,58	8,22	82,2
90—100	1,47	1470	3,81	5,60	56,0	7,56	11,11	111,10	11,34	16,67	166,70	17,0	24,99	249,90	5,66	8,32	83,2
50—100	—	7310	—	25,96	259,60	—	56,95	569,50	—	85,43	854,30	—	130,50	1305,0	—	45,07	450,7
0—100	—	13 750	—	52,38	523,80	—	112,68	1126,80	—	—	1730,10	—	—	2979,1	—	—	1249,0

Таблица 10

Состав и температура различных  
охладительных смесей

Количество соли на 100 г льда или снега	t°C
10 г K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	— 1,9
13 г K <sub>2</sub> NO <sub>3</sub>	— 2,9
30 г KCl	— 10,6
25 г NH <sub>4</sub> Cl	— 21,2
200 г CaCl <sub>2</sub>	— 35,0



Таблица значений  $\ln C_n - \ln C_{n+k}$  при  $k = 20$  делениям шкалы

$C_n$	$\ln C_n - \ln C_{n+k}$								
150	0,143	125	0,174	100	0,223	75	0,310	52	0,485
149	0,144	124	0,176	99	0,226	74	0,315	51	0,498
148	0,145	123	0,177	98	0,228	73	0,320	50	0,511
147	0,146	122	0,179	97	0,231	72	0,325	49	0,524
146	0,147	121	0,181	96	0,234	71	0,331	48	0,539
145	0,148	120	0,182	95	0,236	70	0,336	47	0,554
144	0,150	119	0,184	94	0,239	69	0,342	46	0,570
143	0,151	118	0,186	93	0,242	68	0,348	45	0,588
142	0,152	117	0,187	92	0,245	67	0,355	44	0,606
141	0,153	116	0,189	91	0,248	66	0,361	43	0,628
140	0,154	115	0,191	90	0,251	65	0,368	42	0,647
139	0,155	114	0,193	89	0,255	64	0,375	41	0,669
138	0,157	113	0,195	88	0,258	63	0,382	40	0,693
137	0,158	112	0,197	87	0,261	62	0,390	39	0,719
136	0,159	111	0,199	86	0,265	61	0,397	38	0,747
135	0,160	110	0,201	85	0,268	60	0,409	37	0,778
134	0,162	109	0,203	84	0,272	59	0,414	36	0,811
133	0,163	108	0,205	83	0,276	58	0,423	35	0,847
132	0,164	107	0,207	82	0,280	57	0,432	34	0,887
131	0,166	106	0,209	81	0,284	56	0,442	33	0,932
130	0,167	105	0,211	80	0,288	55	0,452	32	0,981
129	0,168	104	0,215	79	0,292	54	0,463	31	1,036
128	0,170	103	0,216	78	0,296	53	0,474	30	1,098
127	0,171	102	0,218	77	0,301				
126	0,173	101	0,221	76	0,305				

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5

## Глава I

### Механический анализ почвы

Классификация механических элементов почвы . . . . .	10
Методы подготовки почвы к механическому анализу . . . . .	11
Физические методы подготовки почвы . . . . .	12
Растирание влажной почвы (12). Кипячение почвенной суспензии (12). Взбалтывание почвенной суспензии вручную или на аппарате (13). . . . .	14
Химические и химико-механические методы . . . . .	14
Метод Качинского (14). Международный метод А (15) . . . . .	16
Суданский или содовый метод (16) . . . . .	17
Метод Пури ( ) . . . . .	17
Подготовка карбонатных почв к механическому анализу . . . . .	17
Методы определения механического состава почв . . . . .	18
Определение механического состава визуально и наощупь (18). Просеивание почвы на ситах (20). Отмучивание частиц потоком воды разной скорости (по Шене) (21). Методы отмучивания в стоячей воде (22). Выделение из почв и грунтов фракций различного размера отмучиванием (26). Ареометрический метод (29). Седиментометрический метод (37). Определение механического состава по средней пробе в стоячей воде (40). . . . .	52
Способы выражения данных механического анализа . . . . .	53
Практическое использование данных механического анализа . . . . .	58
Изображение механического состава на почвенных картах . . . . .	—
Вычисление некоторых физических показателей по механическому составу . . . . .	—

## Глава II

### Анализ структуры почвы

Морфологическая характеристика структуры . . . . .	64
Микроагрегатный анализ . . . . .	68
Микроагрегатный анализ почвы по методу Н. А. Качинского (68). Коэффициенты дисперсности и структурности почвы (69)	

Методы определения водопрочности макроструктуры почв . . . . .	70
Метод Н. И. Саввинова (70). Вариант структурного анализа Вершинина и Ревута (74). Микроагрегатный анализ почвы методом качания сит (75) . . . . .	
Определение размываемости агрегатов по методу Д. Г. Виленского (77). Определение водопрочности почвенных агрегатов в стоячей воде (79). Метод Фадеева—Вильямса (82). Определение водопрочности структуры почвы в образцах ненарушенного сложения (83). Определение механической прочности (связности) почвенных агрегатов . . . . .	86
Определение порозности агрегатов . . . . .	87
Метод парафинирования (87) . . . . .	
Метод микрофотографирования (91) . . . . .	
Коллоидно-химический и микроскопический анализ почвенных агрегатов . . . . .	

### Глава III

#### Методы определения удельного веса и порозности почвы

Удельный вес твердой фазы почвы (97) . . . . .	
Определение удельного веса твердой фазы почвы (98) . . . . .	
Определение объема пикнометра (100). Подготовка почвы для анализа (101). Определение удельного веса твердой фазы почвы (101) . . . . .	
Удельный вес скелета почвы . . . . .	105
Определение удельного веса скелета почвы буровым методом (105). Фиксажный метод Пигулевского и Зеберга (108). Определение удельного веса скелета почвы с помощью жидкостей (110). Определение удельного веса скелета почвы по методу С. Н. Пустовойта (111). Песчаный метод определения объемного веса почвы (112) . . . . .	
Измерение плотности почвы гаммаскопическим методом . . . . .	114
Порозность почвы . . . . .	113
Определение порозности с помощью приборов (116)	
Определение порозности методом расчетов (120)	

### Глава IV

#### Методы изучения воздушных свойств почв и состава почвенного воздуха

Физическое состояние почвенного воздуха . . . . .	125
Свободный воздух (125). Воздух, сорбированный почвой (126). Растворенный почвенный воздух (126)	
Воздушные свойства почв и методы их определения . . . . .	127
Воздухоемкость (127) Методы определения воздухоемкости почвы (128). Выделение и учет адсорбированного воздуха (130)	
Воздухопроницаемость почвы . . . . .	133
Газообмен между почвой и атмосферой (136)	
Взятие проб почвенного воздуха и определение его состава . . . . .	145
Буровой метод (145). Метод вытеснения почвенного воздуха жидкостью (148). Анализ почвенного воздуха . . . . .	145
Приборы для определения состава почвенного воздуха . . . . .	152
Определение газов при низких концентрациях (155). Определение паров воды в почвенном воздухе (156). Определение растворенных газов в почвенной воде (156)	
Аэрация почвенного раствора и окислительно-восстановительный потенциал . . . . .	160

## Глава IX

### Тепловые свойства почв и методы их измерения

Теплота смачивания . . . . .	268
Тепловые свойства почв . . . . .	272
Теплоемкость почвы (272). Определение теплоемкости с помощью калориметра (273). Теплопроводность почвы (276), Определение теплопроводности почв шаровым зондом (ШЗ) (276).	
Температуропроводность почв (280) . . . . .	
Температура почвы . . . . .	285
Измерение глубины промерзания почвы (294).	
Определение замерзающей и незамерзающей воды с помощью калориметра (295)	

## Глава X

### Физико-механические свойства почвы

Твердость почвы . . . . .	300
Определение твердости почвы прибором ВИСХОМа (301). Определение твердости почвы прибором Качинского (306).	
Сопrotивление почв и грунтов сдвигу . . . . .	309
Липкость почвы . . . . .	315
Пластичность почвы . . . . .	318
Расчет удельного сопротивления и тяговых усилий по твердости почв (322). Расчет тяговых сопротивлений комбайнов по твердости почв (323) . . . . .	
Литература . . . . .	325
Приложения . . . . .	326

---

*Александра Федоровна Вадюнина*  
*Зинаида Алексеевна Корчагина*

**Методы определения  
физических свойств почв  
и грунтов  
в поле и лаборатории**

Редактор *И. М. Шагирова*  
Технический редактор *Л. Л. Ежова*  
Корректор *Е. Т. Тихонова, Е. А. Ланина,*  
*Н. А. Смирнова.*

---

Сдано в набор 21/І 1961 г.

Подписано к печати 16/ІХ 1961 г.

Бумага 60 × 90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. 21,75 печ. л. 20,18

уч.-изд. л. Тираж 4000 экз. Т — 07289

Изд. № Е/52. Цена 71 коп. Зак. 78.

---

Государственное издательство «Высшая  
школа», Москва, Б-62, Подсосенский пер., 20.

Типография издательства «Звезда»  
Минск, Ленинский проспект, 79.