

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

И. В. БОЛОТНИКОВА

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

по курсу

„ГИДРОГЕОЛОГИЯ“

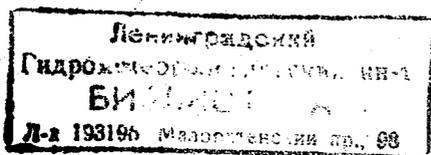
Т е м а: «Гранулометрический состав рыхлых горных пород»

ЛЕНИНГРАД
1982

УДК 556.3(076.5)

*Одобрено кафедрой гидрогеологии и геодезии Ленинградского
гидрометеорологического института*

В данной работе описаны методы гранулометрического анализа горных пород, приборы и оборудование, способы обработки результатов лабораторных исследований, расчетные формулы, предусмотренные программой курса «Гидрогеология» для студентов, обучающихся по специальности «Гидрология суши».



© Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ), 1982.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторные занятия являются обязательной и весьма важной составной частью учебного процесса по изучению курса «Гидрогеология» студентами гидрологической специальности Ленинградского гидрометеорологического института.

Для успешного усвоения теоретического материала о процессах, которые обуславливают физическое состояние горных пород, их отношение к воде и т. д., учебным планом и программой предусмотрены самостоятельные занятия студентов в лаборатории. На лабораторных занятиях они знакомятся с современными методами, приборами и оборудованием, применяемыми при изучении физико-механических свойств горных пород в гидрогеологических исследованиях, со способами обработки результатов лабораторных исследований, с расчетными формулами и т. д. В руководстве описаны только те методы, которые предусмотрены программой для самостоятельной проработки студентами в лаборатории.

Прежде чем приступить к выполнению лабораторных работ по теме «Гранулометрический состав рыхлых горных пород», студентам необходимо вспомнить, что понимается под их физико-механическими свойствами и каковы особенности отдельных фракций, выделяемых с помощью различных методов анализов. Ниже приводятся краткие сведения об этом.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЫХЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Всякая горная порода представляет собой сложную систему, состоящую из следующих частей:

- твердые минералы и органические частицы, составляющие скелет породы;
- поры, пустоты, трещины различной формы, размеров и происхождения;

— вода в порах, пустотах и трещинах, находящаяся в различном физическом состоянии: парообразном, связанном, жидком и твердом;

— газы и пары в свободной от воды части пор, пустот и трещин.

Горные породы по своим физическим, механическим и химическим свойствам чрезвычайно разнообразны. Эти свойства не остаются постоянными, а изменяются под влиянием различных геофизических процессов. Чтобы иметь представление о характере этих процессов, необходимо тщательное изучение механических, физических и водных свойств горных пород.

По механическим свойствам все горные породы делятся на три большие группы: скальные, полускальные и рыхлые. По классификации Ломтадзе (1972) — на скальные, полускальные, рыхлые несвязные, мягкие связные, породы особого состава и состояния (мерзлые породы).

Скальные и полускальные горные породы характеризуются массивностью, часто имеют кристаллическое строение, обладают структурными кристаллизационными или упругими аморфными связями. Водные растворы, пары и газы циркулируют в породах лишь в пределах трещин и редких пустот различной величины и происхождения.

Рыхлые горные породы представляют собой продукты разрушения скальных и полускальных пород, часто перетолженные под влиянием ветра, текущей воды и передвигающихся масс льда. Рыхлые породы могут находиться в сыпучем, полусвязном и связанном состояниях.* Водные растворы, пары и газы циркулируют в них по многочисленным мелким и крупным промежуткам между отдельными зернами.

Под физико-механическими свойствами горных пород понимаются свойства, характеризующие физическое состояние (удельный и объемный вес, пористость, плотность, трещиноватость, влажность), отношение к воде (водопроницаемость, влагоемкость, водоотдача) и особенности поведения под влиянием внешних нагрузок (упругость, прочность, сопротивление сдвигу). Физико-механические свойства рыхлых пород зависят от величины и формы зерен, их минералогического состава и т. д.

Зависимость физико-механических свойств рыхлых пород от размера и формы частиц обусловлена тем, что рыхлая порода представляет собой многофазную дисперсную систему, обладающую внутренней и поверхностной энергией. Поверхностная энергия пропорциональна удельной поверхности дисперсной фазы, и величина ее тем больше, чем мельче раздроблена порода. Зависи-

* Связность породы — способность оставаться в компактном виде и сохранять свою форму в сухом и во влажном состоянии.

мость физико-механических свойств рыхлых пород от минералогического состава связана с тем, что различные минералы, из которых состоит порода, обладают разной формой, твердостью, удельным весом, упругостью и т. д. Поэтому породы, состоящие из разных минералов, должны обладать неодинаковыми свойствами. Однако эти различия в большей степени выражены в крупнообломочных породах. По мере увеличения степени дисперсности рыхлых пород зависимость их физико-механических свойств от минералогического состава постепенно становится менее заметной. Это объясняется тем, что частицы породы обычно покрыты пленкой воды, значение которой ничтожно в крупнообломочных породах и возрастает с уменьшением размеров частиц.

Прежде чем перейти к рассмотрению методов гранулометрического анализа, предусмотренных программой курса, рассмотрим основные фракции и их характеристику.

ОСНОВНЫЕ ФРАКЦИИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Рыхлые горные породы состоят из частиц различного диаметра, от долей микрона до нескольких сотен миллиметров. Зернам различных размеров, слагающим породу, присущи определенные физические и водные свойства. В рыхлых породах можно выделить пять основных групп частиц или фракций:

1. **Гравелистая фракция:** диаметр частиц от 2 до 10 мм, наиболее распространена в прибрежных мелководных частях водных бассейнов, среди флювиогляциальных образований, на речных террасах, в долинах горных рек и временных водотоков. Обладает высокой водопроницаемостью, полной водоотдачей и не меняет своего объема при изменении степени влажности. Капиллярные силы в гравелистой фракции не проявляются.

2. **Песчаная фракция:** диаметр частиц от 2 до 0,1 мм. Различают грубопесчаную фракцию, диаметр которой находится в пределах от 2 до 1 мм, крупнопесчаную фракцию — от 1 до 0,5 мм, средnepесчаную фракцию — от 0,5 до 0,25 мм, и мелкопесчаную фракцию диаметром от 0,25 до 0,1 мм.

Эти фракции обладают высокой водопроницаемостью и водоотдачей, уменьшающимися с уменьшением диаметра частиц. При изменении увлажнения песчаная фракция не изменяет объема, т. е. не набухает в воде и не дает усадки при высыхании. Этой фракции свойственно проявление капиллярных сил. Причем величина капиллярного поднятия увеличивается с уменьшением диаметра частиц.

3. **Пылеватая фракция:** диаметр частиц от 0,1 до 0,005 мм. Они могут откладываться в реках при очень медленном течении, в затоках, озерах, морях и океанах (при отсутствии сильных течений). Различают крупную пыль, диаметр частиц которой нахо-

дится в пределах от 0,1 до 0,05 мм, и мелкую пыль размером от 0,05 до 0,005 мм.

Пылеватая фракция обладает незначительной водопроницаемостью и слабой водоотдачей. При увлажнении слабо набухает, приобретает связность. При насыщении водою легко переходит в пльвинное состояние. Величина капиллярного поднятия измеряется десятками и сотнями сантиметров.

4. Глинистая фракция: диаметр частиц от 0,005 до 0,0001 мм. Представляет собой тонкодисперсные частицы, отложение которых может происходить либо в руслах рек в застойных условиях, на дне глубоких озер, морей, океанов, либо путем выветривания коренных магматических или осадочных пород. Глинистые частицы связаны между собой поверхностными силами взаимного притяжения и сложными водно-коллоидными связями и энергично взаимодействуют с водой: при увлажнении сильно набухают и обладают разной степенью пластичности. Высота капиллярного поднятия может достигать нескольких сотен сантиметров.

5. Коллоидно-дисперсные частицы диаметром менее 0,0001 мм находятся главным образом в глинистых породах, обуславливают высокую адсорбционную способность пород, активность протекающих в них процессов ионного обмена и высокую степень набухания в воде. Минеральные коллоиды (частицы глины, коллоидного кремнезема, гидрата окиси железа и др.), видимые в микроскоп только при большом увеличении, проходят через обычные фильтры и в присутствии электролитов в воде коагулируют, переходя в твердое состояние. Коллоиды обладают способностью к поглощению катионов из раствора солей. Если коллоиды насыщены основаниями, то они могут вступать в реакции ионного обмена, изменяя физические и водные свойства горной породы. Отдавая, например, поглощенный натрий и взамен его поглощая эквивалентное количество кальция, коллоиды способствуют увеличению рыхлости породы и повышению ее водопроницаемости. Наоборот, замещение кальция натрием способствуют разбуханию глинистых пород, увеличению их вязкости и уменьшению водопроницаемости.

Рыхлые горные породы чрезвычайно редко представляют собой скопление какой-либо одной фракции. Обычно все основные фракции находятся в горной породе в тех или иных соотношениях. Поэтому физико-механические и водные свойства рыхлых горных пород зависят от соотношения в них основных фракций, в соответствии с рассмотренными особенностями каждой фракции.

Определения размеров зерен и частиц и их соотношение в рыхлых горных породах имеет большое научное и практическое значение. Эти определения помогают выяснить физико-геологические условия формирования водоносных горных пород, используются при гидрогеологических расчетах, связанных с движением подземных вод, находят применение при подборе фильтров и, на-

конец, служат классификационным признаком для систематизации рыхлых горных пород.

При исследовании физико-механических свойств рыхлых горных пород производится анализ их гранулометрического состава.

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ РЫХЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И МЕТОДЫ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Под гранулометрическим (механическим) составом рыхлых горных пород понимается процентное содержание в породе групп частиц (фракций) различных размеров, взятых по отношению к весу абсолютно сухой породы (Ломтадзе, 1972 г.). Сущность гранулометрического анализа состоит в разделении рыхлой горной породы на составные части по величине частиц, начиная от самых крупных. Размер частиц, слагающих породу, выражают обычно в миллиметрах.

В настоящее время существует много методов гранулометрического анализа, из которых наиболее часто применяемые делятся на прямые и косвенные.

Прямые методы называют такие методы, которые позволяют непосредственно выделить необходимые фракции и определить их процентное содержание.

Косвенные же методы основаны на использовании таких свойств породы, изменение которых позволяет судить о содержании тех или иных фракций, не выделяя их из породы. К прямым методам относятся ситовой, пипеточный, Сабанина и другие. К косвенным — визуальный, ареометрический, Рутковского.

Наиболее простым определением гранулометрического состава является просеивание рыхлой породы через набор стандартных сит. Однако такое определение имеет свой предел по величине минимального размера фракций из-за конечной тонкости ситовой ткани (обычно 0,1 мм) и из-за трудности разделения в сухом виде агрегатов мелких фракций на отдельные зерна. Поэтому полный анализ песчано-глинистых пород распадается на две отдельные операции (или два отдельных анализа).

1. Определение процентного содержания в породе зерен с частицами, размером больше 0,1 мм, путем просеивания через стандартный набор сит (ситовой анализ).

2. Определение процентного содержания в породе частиц, размером менее 0,1 мм, путем измерения скорости их осаждения в воде (пипеточный анализ).

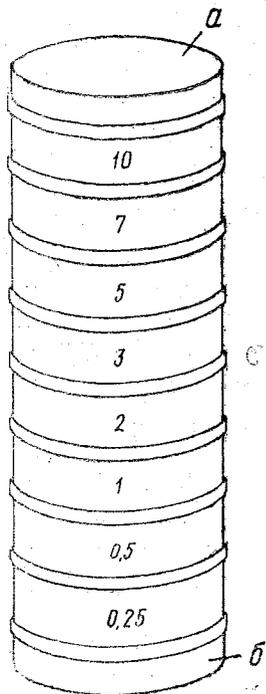
Первая из описанных операций не встречает никаких принципиальных трудностей. Для второй операции грунт должен быть прежде всего подготовлен: промыт, подвергнут длительному кипячению и растерт в воде для разъединения мелких слипшихся частиц (агрегатов). Эта операция носит название диспергирования. Водная среда, в которой взвешены глинистые частицы, называется дисперсионной средой, а сами твердые частицы, взмученные в воде (видимые и невидимые простым глазом), — суспензией. Иногда для лучшего диспергирования грунта к суспензированному раствору приходится добавлять некоторое количество аммиака.

Соответствующие приемы, используемые в том или ином анализе для ликвидации образования агрегатов, будут рассмотрены при описании хода анализа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Ситовой метод

Ситовой анализ, являющийся основным методом определения гранулометрического состава песчаных пород, производится при помощи специального набора сит со штампованными отверстиями 10; 7; 5; 3; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,1 мм (иногда стандартный набор сит заканчивается отверстиями 0,25 мм). Сита собираются в колонну так, чтобы отверстия их уменьшались сверху вниз. На верхнее сито надевают крышку (а), а под нижнее сито подставляют поддон (б) (рис. 1).



Необходимое оборудование: набор стандартных сит; технические весы с разновесами; фарфоровые чашки; фарфоровая ступка и пестик с резиновым наконечником; ложка или совок; лист бумаги.

Рис. 1. Набор сит для гранулометрического анализа

Подготовка пробы и проведение анализа

1. Довести пробу рыхлой породы до воздушно-сухого состояния. Для этого рассыпать ее тонким слоем на листе бумаги и оставить на воздухе на 1—2 суток. (В учебной лаборатории пробы, как правило, уже воздушно-сухие).

2. Взять среднюю пробу квартованием. Для этого породу тщательно перемешать, рассыпать тонким слоем и разделить шпателем или обратным концом ложки, или совка двумя взаимноперпендикулярными линиями на четыре равные части (квадранты). Два противоположных квадранта оставить в качестве сокращенной пробы, а два других удалить. Такое квартование пробы производить до тех пор, пока на листе бумаги не останется необходимый для анализа вес пробы:

а) для пород, не содержащих частиц крупнее 2 мм — 200 г;

б) для пород, содержащих частицы крупнее 2 мм до 10% — 500 г;

в) для пород, содержащих частицы крупнее 2 мм от 10 до 30% — 200 г, при большем содержании — 300 г.

3. Породу, состоящую из слипшихся агрегатных комочков, растереть в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником. Растирать пробу следует осторожно, чтобы избежать разрушения отдельных зерен.

4. Отобранную пробу породы взвесить на технических весах с точностью до 0,01 г и общий вес ее записать в табл. 1.

5. Взвешенную пробу просеять через колонну сит с помощью легких боковых ударов ладонями рук до полной сортировки частиц породы в ситах на фракции. Для проверки полного разделе-

Таблица 1

Определение гранулометрического состава пробы ситовым методом (проба №)

Дата	Навеска, г	Показатели	Ф р а к ц и и, мм									
			>10	10—7	7—5	5—3	3—2	2—1	1—0,5	0,5—0,25	<0,25	
		Вес фарфоровой чашки (тары) с фракцией, г										
		Вес фарфоровой чашки, г										
		Вес фракции, г										
		Содержание фракции, %										
		Суммарное содержание фракций, %										

ния пробы на фракции взять каждое сито (начиная с 3 мм) и просеять над листом бумаги. Частицы породы, прошедшие через сито, всыпать в сито с нижележащей фракцией, а взятое сито поместить в колонну сит и продолжать сортировку.

6. Каждую фракцию, оставшуюся на сите и в поддоне, собрать в предварительно взвешенную фарфоровую чашку, взвесить на технических весах, с точностью до 0,01 г, и вычислить чистый вес каждой фракции.

В результате просеивания на ситах остаются следующие фракции:

На сите с отверстиями, мм	Фракции, мм	На сите с отверстиями, мм	Фракции, мм
10	>10	1	2—1
7	10—7	0,5	1—0,5
5	7—5	0,25	0,5—0,25
3	5—3	в поддоне	менее 0,25
2	3—2		

7. Вычислить процентное содержание каждой фракции по формуле

$$X = \frac{A}{B} \cdot 100\%,$$

где X — содержание фракции в породе; A — вес фракции, г; B — общий вес навески, г.

Данные анализа занести в табл. 1.

8. Подсчитать ошибку анализа (Δ). Для этого сложить вес отдельных фракций и сравнить полученную сумму с первоначальным весом навески, взятой для анализа. Расчет произвести по формуле

$$\Delta = \frac{B-F}{B} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где Δ — ошибка анализа, %; B — общий вес навески, г; F — суммарное содержание фракций, г.

Ошибка анализа не должна превышать 1%. В противном случае анализ следует повторить.

9. При исследовании глинистых песков отобрать среднюю пробу на гранулометрический анализ, как указано в п. 2, взвесить ее, поместить в фарфоровую чашку и отмыть от глинистых и пылеватых частиц. Для этого песок в фарфоровой чашке залить водой и растереть пестиком с резиновым наконечником. После некоторого отстаивания (примерно 60 с) воду со взвешенными в ней пылеватоглинистыми частицами осторожно слить. Промыть пробу до полного осветления воды. Промытый песок высушить, взвесить и произвести анализ, как указано в п. 5 и 6.

10. Результаты анализа глинистых песков вычислить так же, как в п. 7. Содержание же фракций менее 0,1 мм вычислить по разности между общей навеской в граммах и суммой весов всех фракций крупнее 0,1 мм.

11. Если фракций диаметром менее 0,1 мм содержится в пробе более 10% (по весу), то гранулометрический анализ следует продолжить пипеточным методом, для выделения этих мелких фракций.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Пипеточный метод

Пипеточный метод применяется для определения гранулометрического состава мелкопесчаных и, главным образом, глинистых пород. Как уже указывалось, он может применяться и в комбинации с ситовым методом, при наличии в породе фракций крупнее 0,1 мм.

Пипеточным методом определяют в породе фракции диаметром более 0,1; 0,1—0,05; 0,05—0,01; 0,01—0,002; 0,002—0,001 и менее 0,001 мм.

Сущность этого метода заключается в разделении породы на фракции по различной скорости падения частиц в воде. Скорость падения частиц в воде определяется по формуле Стокса

$$v = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\gamma - \gamma_w}{\eta}, \quad (3)$$

где v — скорость падения частиц в воде, см/с; g — ускорение силы тяжести, см/с²; r — радиус частиц, мм; γ — удельный вес частиц, г/см³; γ_w — удельный вес воды, г/см³; η — вязкость воды, пз.

Необходимое оборудование и материалы: аналитические весы с разновесами; технические весы с разновесами; сушильный шкаф; цилиндр емкостью 1200—1300 см³, высотой 45 см, диаметром 6 см; пипетка конструкции Захарьева

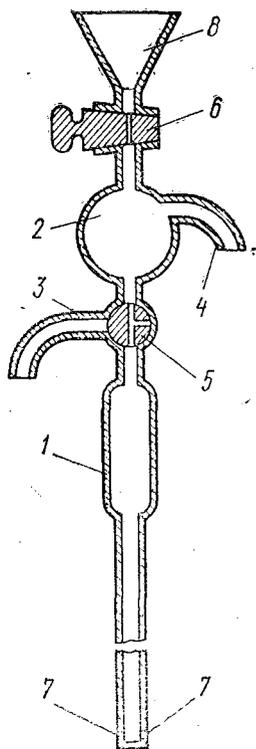


Рис. 2. Пипетка конструкции Захарьева

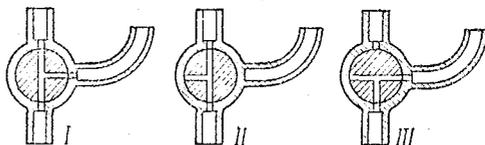


Рис. 3. Рабочие положения крана 5 пипетки:

I — при подготовке пипетки для взятия пробы; II — при всасывании суспензии; III — при сливании суспензии

ва емкостью 25 см³; коническая колба емкостью 250 см³ с обратным холодильником; фарфоровая чашка диаметром 16 см; фарфоровая ступка и пестик с резиновым наконечником; бюксы; сито с отверстиями 0,1 мм; песчаная или водяная баня; промывалка или резиновая груша; мешалка; эксикатор, секундомер; термометр; раствор 25% аммиака; лист бумаги; штатив.

Применяемая в этом методе пипетка конструкции Захарьева, для взятия проб суспензии, имеет следующие конструктивные особенности: два утолщения — цилиндрическое 1 и шарообразное 2 — и две отводящих трубки 3, 4. Отводящая трубка 4 через шланг соединяется с резиновой грушей. Над цилиндрическим утолщением 1 имеется трехходовой стеклянный кран 5, а над шарообразным утолщением 2 — двухходовой кран 6 и воронка 8 для промывания пипетки водой. Нижний конец пипетки запаян, но с боков имеются отверстия 7 (рис. 2).

Чтобы взять пробу, нижний конец пипетки следует погрузить в цилиндр с суспензией на соответствующую глубину. Двухходовой 6 кран перекрыть, а трехходовой кран 5 поставить в положение I (рис. 3), сжать резиновую грушу, а кран 5 поставить в положение II. После того как всасываемая суспензия заполнит пипетку выше крана 5, кран повернуть в положение I, а пипетку вынуть из суспензии. Лишнюю суспензию, расположенную выше крана 5, выдуть при помощи резиновой груши через отводящую трубку 3, а всю оставшуюся в пипетке суспензию вылить в предварительно взвешенный бюкс, при этом кран 5 установить в положение III.

Подготовка пробы и проведение анализа

1. Поместить 200—300 г анализируемой породы в фарфоровую ступку и растереть пестиком с резиновым наконечником для разрушения структурных агрегатов.

2. Растертую породу высушить до воздушно-сухого состояния и просеять через сито 0,25 мм, взвесить на технических весах с точностью до 0,01 г и определить процентное содержание фракций больше 0,25 мм. При наличии в породе значительного количества крупных фракций сделать ситовой анализ.

3. Из прошедшего сквозь сито 0,25 мм мелкозема взять на аналитических весах навеску породы из расчета на абсолютно-сухой вес, для глин — около 10 г, для суглинков — 15 г, для супесчаных

и песчаных пород 20—40 г. Одновременно взять вторую навеску 5—10 г для определения гигроскопической влажности.*

4. Анализируемую навеску перенести в коническую колбу с обратным холодильником, залить десятикратным, по отношению к навеске, количеством дистиллированной воды, добавить 1 см³ аммиака и кипятить в течение часа на песчаной или водяной бане.

5. Остывшую суспензию тщательно, чтобы на стенках колбы не осталось частиц, перенести на сито 0,25 мм, предварительно смоченное и поставленное в большую фарфоровую чашку. Налить в чашку такое количество воды, чтобы уровень ее был выше дна сита, и осторожно растереть пальцем осадок, приподнимая сито из воды и вновь его опуская. Эту операцию следует производить до тех пор, пока из сита не будет вытекать чистая вода, а в осадке останутся только песчаные фракции.

6. Прошедшую через сито 0,25 мм суспензию сливают в цилиндр, доливают до литровой метки водой. На этом подготовка суспензии для дальнейшего анализа заканчивается.

7. Оставшиеся на сите 0,25 мм песчаные фракции слить в предварительно взвешенную фарфоровую чашку, слить после отстаивания избыток воды, высушить осадок и просеять через набор сит. Каждую фракцию взвесить на технических весах и вычислить ее процентное содержание в породе по формуле

$$X = \frac{A \cdot c}{b}, \quad (4)$$

где A — вес фракции, г; c — суммарное процентное содержание фракций, взятых на анализ. Если не было отдельно ситового анализа, то c равно 100%; если был ситовой анализ, а для пипеточного анализа взята фракция менее 0,25 мм, то c равно 100% минус суммарное процентное содержание фракций крупнее 0,25 мм; b — вес взятой навески, пересчитанный на абсолютно-сухое состояние породы, г.**

* Гигроскопическую влажность вычислить по формуле

$$W = \frac{g_2 - g_3}{g_3 - g_1} \cdot 100,$$

где W — гигроскопическая влажность, %; g_1 — вес бюкса, г; g_2 — вес бюкса с влажной навеской, г; g_3 — вес бюкса с высушенной до постоянного веса навеской, г. Взвешивание производить на аналитических весах, влажность вычислить с точностью до 0,1%.

** Пересчет веса навески, взятой на пипеточный анализ, на абсолютно-сухой вес произвести по формуле

$$b = \frac{B \cdot 100}{100 + W}, \quad (5)$$

где b — вес навески породы в абсолютно-сухом состоянии, г.; B — вес навески породы в воздушно-сухом состоянии, г; W — гигроскопическая влажность, %.

8. Измерить температуру суспензии в цилиндре, взмутить суспензию мешалкой до полного исчезновения осадка на дне и оставить в покое на время, указанное в табл. 2.

9. По истечении указанного срока осторожно, не взбалтывая суспензии, опустить нижний конец пипетки в цилиндр на глубину 10 см и отобрать первую пробу с частицами диаметром менее 0,05 мм. Частицы крупнее 0,05 мм за это время успевают осесть.

Таблица 2

Время отстаивания суспензии (по Ломтадзе, 1972 г.)

Проба фракции	Температура, °С				
	10	12	15	17	20
Первая (<0,05 мм)	58с	55с	5'с	48с	45с
Вторая (<0,01 мм)	24 мин 18с	22 мин 59с	22 мин 14с	20 мин 9с	18 мин 44с
Третья (<0,002 мм)	5 ч 3 мин	4 ч 47 мин	4 ч 25 мин	4 ч 12 мин	3 ч 54 мин
Четвертая (<0,001 мм)	20 ч 5 мин	19 ч 9 мин	17 ч 42 мин	16 ч 48 мин	15 ч 36 мин

10. Суспензию из пипетки слить в предварительно взвешенный бюкс, промыть пипетку и слить содержимое в этот же бюкс.* Воду выпарить, осадок высушить и взвесить на аналитических весах, предварительно охладив его в эксикаторе. Процентное содержание фракций <0,05 мм вычислить по формулам:

$$A = \frac{aV}{V_1}, \quad X = \frac{Ac}{b}, \quad \text{или} \quad X = \frac{aVc}{bV_1}, \quad (6)$$

где A — вес частиц диаметром менее 0,05 мм во всем объеме суспензии, г; a — вес частиц диаметром менее 0,05 мм в объеме пипетки (вес высушенной пробы), г; V — объем суспензии в цилиндре, см³; V_1 — объем суспензии в пипетке, см³; X — процентное содержание в породе частиц диаметром менее 0,05 мм; c — суммарное процентное содержание фракций, взятых на анализ (если не было отдельно ситового анализа, то c равно 100%, см. п. 7); b — вес навески, взятой для пипеточного анализа, пересчитанный на абсолютно-сухой вес, г.

11. Измерив температуру суспензии в цилиндре, вновь ее взмутить, как указано в п. 8, и оставить в покое на время (см. табл. 2).

12. По истечении указанного времени с глубины также 10 см отобрать пипеткой вторую пробу, содержащую фракции менее

* Промывать пипетку следует после взятия каждой пробы.

15. Вычислить фракции 0,25—0,05 мм по разности между 100% и суммой процентов всех фракций, оставшихся на сите с отверстиями 0,25 мм и определенных пипеточным методом, и фракции менее 0,25 мм — процентное содержание частиц, оставшихся на сите с отверстиями 0,25 мм (см. п. 7).

16. Все данные анализа записать в табл. 3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Ареометрический метод

Гранулометрические анализы пород (метод Робинсона, Сабанина), основанные на отборе из водного раствора проб через известные промежутки времени с последующим определением сухого остатка путем выпаривания и взвешивания, весьма длительны, трудоемки и требуют большого количества дистиллированной воды. Ареометрический метод гранулометрического анализа наиболее прост и лишен этих недостатков.

Поэтому он широко входит в лабораторную практику. Этот метод основан на измерении ареометром изменяющейся во времени (по мере выпадания из воды взвешенных частиц породы) плотности суспензированного раствора. Ареометрическим методом определяют содержание в рыхлой горной породе фракции диаметром менее 0,25 мм. Содержание фракций крупнее 0,25 мм определяют ситовым методом.

Ареометр, применяемый для гранулометрического анализа, представляет собой запаянную стеклянную трубку с расширенным нижним концом (луковицей) и верхней более узкой частью, называемой стержнем (рис. 4).

Ареометр рассчитан для измерения плотности жидкости от 0,995 до 1,030. Деления на стержне нанесены с точностью до 0,001. Для удобства работы с ареометром отсчеты берут упрощенные: отбрасывают единицу, а запятую перено-

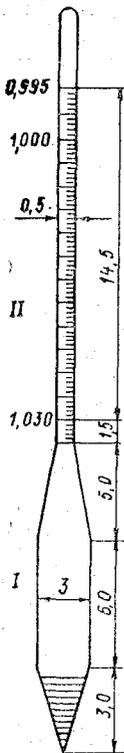


Рис. 4. Схема ареометра:
I — луковица; II — стержень

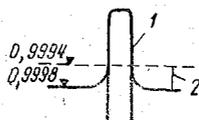


Рис. 5. Определение высоты мениска при измерении плотности суспензии ареометром
1 — стержень ареометра;
2 — высота мениска

сят на три знака вправо. Например, вместо отсчета 1,0245 записывают 24,5. На заводах ареометры градуируют по нижнему краю мениска. Но так как исследуемая суспензия породы непрозрачна, то отсчеты во время анализа берут по верхнему краю мениска и учитывают поправку на его высоту (рис. 5).

Поправка определяется один раз для каждого ареометра погружением его в дистиллированную воду при температуре градуировки, т. е. при 20 °С. Например, отсчет по нижнему краю мениска 0,9998, по верхнему краю 0,9994, высота мениска $0,9998 - 0,9994 = 0,0004$. Так же, как при упрощенном отсчете по ареометру умножить на 1000 и получить поправку на мениск $D = 0,4$. Если при анализе температура суспензии больше или меньше 20 °С, вводят также в показания ареометра поправку на температуру. Она определяется либо на номограмме — по шкале температурных поправок, — либо по табл. 4.

Таблица 4

Температурные поправки к ареометру

Температура суспензии, °С	Поправки к отсчету по ареометру	Температура суспензии, °С	Поправки к отсчету по ареометру
10,0	-1,2	20,0	0,0
10,5	-1,2	20,5	+0,1
11,0	-1,2	21,0	+0,2
11,5	-1,1	21,5	+0,3
12,0	-1,1	22,0	+0,4
12,5	-1,0	22,5	+0,5
13,0	-1,0	23,0	+0,6
13,5	-0,9	23,5	+0,7
14,0	-0,9	24,0	+0,8
14,5	-0,8	24,5	+0,9
15,0	-0,8	25,0	+1,0
15,5	-0,7	25,5	+1,1
16,0	-0,6	26,0	+1,3
16,5	-0,6	26,5	+1,4
17,0	-0,5	27,0	+1,5
17,5	-0,4	27,5	+1,6
18,0	-0,3	28,0	+1,8
18,5	-0,3	28,5	+1,9
19,0	-0,2	29,0	+2,1
19,5	-0,1	29,5	+2,2
		30,0	+2,3

Ленинградский
Гидрометеорологический институт
БИБЛИОТЕКА
Л-1 198196 Малосстенский пр. 68

Необходимое оборудование: ареометр; цилиндр емкостью 1200—1300 см³, высотой 45 см, диаметром 6 см; технические весы с разновесами; аналитические весы с разновесами; песчаная или водяная баня; фарфоровая чашка; бюксы; колба емкостью 250 см³ с обратным холодильником; ступка с пестиком; мешалка;

термометр с точностью делений до $0,5^{\circ}\text{C}$, промывалка или резиновая груша; секундомер; раствор 25%-ного аммиака; номограмма для вычисления диаметра частиц.

Подготовка пробы и проведение анализа

1. Ареометрический метод, так же как и пипеточный, при наличии в породе значительного количества фракций крупнее 0,25 мм, применяется в комбинации с ситовым. Поэтому подготовка образца к анализу проводится так же, как в пипеточном методе (см. п. 1—7).

2. Приготовив суспензию для анализа, объемом 1 л, взяв навеску на гигроскопическую влажность и пересчитав вес воздушно-сухой пробы на ее абсолютно-сухой вес, можно считать подготовку пробы законченной и приступить к проведению ареометрического анализа.

3. Взболтать суспензию мешалкой в цилиндре до полного исчезновения на дне осадка, зафиксировать время (это будет временем начала анализа) и записать его в журнал (табл. 5):

Определение гранулометрического состава пород

Дата	Навеска, г	Влажность, %	Вес абсолютно-сухой породы, г	Время замера, (ч., мин)	Время отстаивания от начала анализа	Упрошенный отсчет по ареометру
	B	W	$b = \frac{B100}{100+W}$	t	T	R_0
18/10—80	35	3	33	9 ч 40 мин 9 ч 40 мин 30 с 9 ч 42 мин 9 ч 45 мин 9 ч 55 мин 10 ч 10 мин 10 ч 40 мин 11 ч 10 мин 12 ч 40 мин 15 ч 40 мин	30 с 1 мин 2 мин 5 мин 15 мин 30 мин 1 ч 1 ч 30 мин 3 ч 6 ч	24,5 23,7 22,5 19,6 11,6 6,8 3,6 2,2 1,2 0,8

4. Осторожно опустить в суспензию ареометр, не касаясь им стенок цилиндра. Через определенные промежутки времени (30 с, 1 мин, 2 мин, 5 мин, 30 мин, 1 ч, 1,5 ч, 3 ч, 6 ч, 24 ч) взять упрощенные отсчеты R_0 по шкале ареометра и записать в журнал. Время каждый раз считать от начала опыта.

5. Отсчеты через 30 с, 1 мин, 2 мин. производить, не вынимая ареометра из суспензии. В дальнейшем его осторожно каждый раз вынимать, обмывать дистиллированной водой и насухо вытирать. При этом опускать ареометр в суспензию следует за 5—10 с до начала измерения, немного глубже предыдущего показания.

6. Замерить температуру суспензии с точностью до $0,5^\circ\text{C}$. В течение первых пяти отсчетов по ареометру — один раз, в дальнейшем — после каждого измерения.

7. Произвести окончательные отсчеты по ареометру R с учетом поправки на высоту мениска D и температуры ($\pm m$).

8. Скорость осаждения частиц в жидкости определить по формуле (3), а диаметр частиц равен $d = \sqrt{Av}$.

Таблица 5

ареометрическим методом (проба №)

Упрощенный отсчет с поправкой на мениск $R_0 + D$	Температура суспензии, $^\circ\text{C}$	Температурная поправка $\pm m$	Окончательный отсчет по ареометру $R = (R_0 + D \pm m)$	Диаметр частиц, мм (по номограмме) d	Содержание фракций меньше определенного диаметра, % $X = R \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{c}{b} \right)$	Диаметр частиц каждой фракции, мм	Содержание каждой фракции в породе, %	Результаты графического определения (по кривой гран. состава)	
								фракции, мм	содержание фракций, %
24,9	16	-0,6	24,3	0,070	97,8	0,070—0,051	3,2	> 10	—
24,1	16	-0,6	23,5	0,051	94,6	0,051—0,037	4,8	10—7	—
22,9	16	-0,6	22,3	0,037	89,8	0,037—0,024	11,7	7—5	—
20,0	16	-0,6	19,4	0,024	78,1	0,024—0,015	32,2	5—3	—
12,0	16	-0,6	11,4	0,015	45,9	0,015—0,011	18,9	3—2	—
7,2	17	-0,5	6,7	0,011	27,0	0,011—0,008	13,9	2—1	—
4,0	17	-0,5	3,5	0,008	14,1	0,008—0,006	5,6	1—0,5	1,20
2,6	17	-0,5	2,1	0,006	8,5	0,006—0,004	3,3	0,5—0,25	2,10
1,6	18	-0,3	1,3	0,004	5,2	0,004—0,002	3,6	0,25—0,05	4,30
1,2	15	-0,8	0,4	0,002	1,6	< 0,002	1,6	0,05—0,01	68,40
								0,01—0,005	10,70
								0,005—0,001	3,60
								< 0,001	9,70

Здесь $A = \frac{\eta \cdot 1800}{g(\gamma - \gamma_w)}$; $v = \frac{H}{t}$; где H — путь частиц, см; t — время падения частиц, с; η — вязкость воды, пз; γ — удельный вес породы, г/см³; γ_w — удельный вес воды, г/см³.

Эта зависимость легла в основу построения номограммы для расчета диаметра частиц (рис. 6).

На специальных шкалах номограммы показаны все величины, входящие в указанную формулу: на шкале № 1 — удельный вес породы γ ; на шкале № 2 — температура суспензии t° ; на шкале № 3 — $A \cdot 10^3$; на шкале № 4 на правой стороне — окончательные отсчеты по ареометру R , т. е. от 0,995 до 1,030, на левой — значения величины H_R , которые при выполнении анализа не учитываются, а используются только для тарировки ареометра;* на шкале № 5 — время отсчета по ареометру T , с., мин., ч., т. е. время отстаивания суспензии от начала опыта; на шкале № 6 — скорость падения частиц в воде v , см/с. На шкале № 7 — диаметр частиц породы d , мм.

9. Вычислить диаметр частиц, пользуясь номограммой и ключом к ней (см. рис. 6). Для этого приложить линейку к шкале № 1 в точке, соответствующей удельному весу исследуемой породы, и к шкале № 2 в точке, показывающей температуру суспензии, на пересечении этой линии со шкалой № 3 получить значение $A \cdot 10^3$. Приложить линейку к шкале № 4 (правая сторона) в точке, соответствующей окончательному отсчету ареометра, и к шкале № 5 в точке, показывающей время данного замера. Пересечение этой линии со шкалой № 6 даст величину скорости падения частиц. Соединив полученные точки на шкалах № 3 и № 6, на пересечении со шкалой № 7, получить искомый диаметр частиц для данного замера.

Пример расчета по номограмме

Удельный вес породы $\gamma = 2,75$. Температура суспензии $t^\circ = 17^\circ\text{C}$. Время, прошедшее от начала анализа, 30 мин. Упрощенный отсчет по ареометру $R_0 = 6,8$. Поправка на температуру (17°C) $m = -0,5$; поправка на высоту мениска $D = 0,4$. Окончательный отсчет по ареометру $R = R_0 \pm m + D = 6,8 + (-0,5) + 0,4 = 6,7$.

Прикладываем линейку к шкале № 1 в точке 2,75 и к шкале № 2 в точке 17°C , читаем на шкале № 3 значение $A \cdot 10^3$, равное

* H_R — расстояние от поверхности жидкости до центра водоизмещения ареометра. У разных ареометров оно различное, поэтому требуется тарировка каждого ареометра для нанесения шкалы R (правая сторона шкалы № 4).

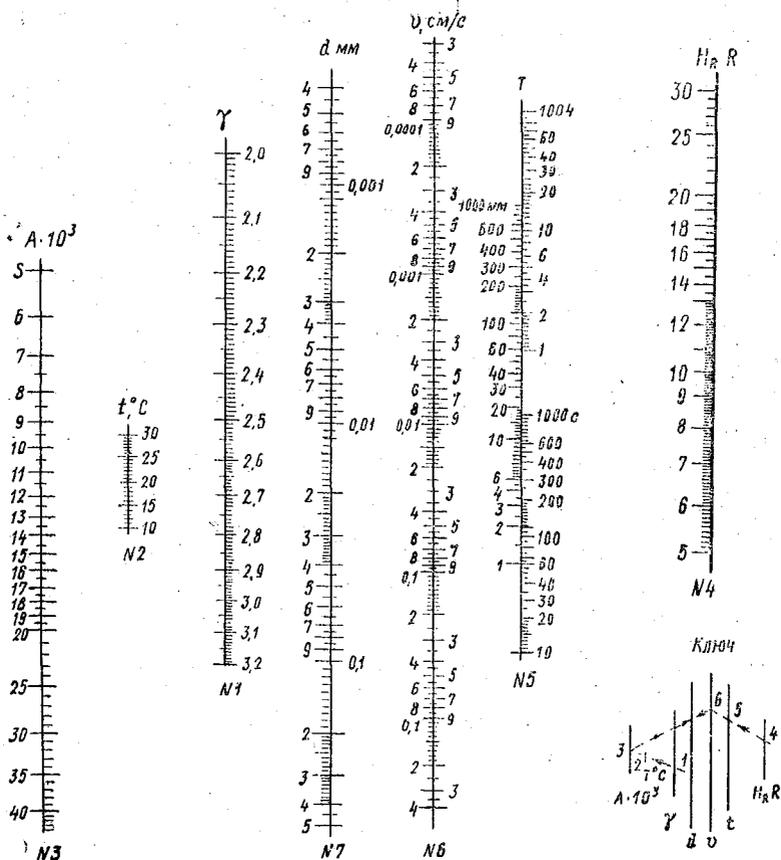


Рис. 6. Номограмма для вычисления диаметра частиц при гра- нулометрическом анализе ареометрическим методом

13,2. Прикладываем линейку к шкале № 4 в точке 6,7, к шкале № 5 в точке 30 мин и читаем на шкале № 6 значение, равное 0,0037 см/с. Соединив точку 13,2 на шкале № 3 и точку 0,0037 на шкале № 6, на пересечении линейки со шкалой № 7, читаем иско- мый диаметр частиц для данного замера. Таким же образом по- лучим значение диаметров и для всех других замеров. Все резуль- таты запишем в табл. 5.

10. Вычислить процентное содержание частиц, отвечающих каждому замеру по формуле

$$X=R \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{c}{b} \right), \quad (7)$$

Признаки для определения гранулометрического

Породы	Ощущение при растирании породы пальцами на ладони руки	Вид растертой массы породы на ладони, при наблюдении в лупу	Состояние сухой породы
1	2	3	4
Глины	Очень трудно растираются в порошок	Однородная тонкопорошковая масса, не содержащая частиц крупнее 0,25 мм	Твердые комья не рассыпаются от удара молотком в порошок и при давлении рукой
Суглинки	Растертая на ладони масса не дает ощущения однородного порошка	Среди преобладающих пылевато-глинистых частиц ясно видны песчаные частицы крупнее 0,25 мм	Комья легко разваливаются при ударе молотком и при давлении рукой
Супеси	Неоднородный порошок, в котором ясно чувствуется присутствие песка	Преобладают песчаные частицы крупнее 0,25 мм, более мелкие являются примесью	Комья легко рассыпаются от давления рукой и при растирании
Пески	Ощущение песчаной массы	Состоит почти вся из зерен песка	Сыпучее
Гравий	—	Присутствие большого количества частиц крупнее 2 мм, при содержании последних свыше 50% разности получают название «гравий»	Сыпучее

где X — процентное суммарное содержание фракций меньше определенного диаметра; R — окончательный отсчет по ареометру; γ — удельный вес исследуемой породы; c — процентное содержание частиц диаметром менее 0,25 мм, определенных ситовым анализом (если частиц диаметром менее 0,25 мм в породе нет, то c равно 100%); b — вес абсолютно-сухой навески, взятой для ареометрического анализа.

Пример расчета. Фракций диаметром крупнее 0,25 мм в исследуемой породе 10%, а фракций менее 0,25 мм — 90% (т. е. $c=90\%$). Удельный вес породы равен 2,75. Навеска b равна

вида пород (по Филатову)

Состояние влажной породы	Отношение породы к скатыванию	Другие признаки
5	6	7
Пластичное, липкое и мажущее	Легко дают прочный длинный шнур диаметром менее 1 мм. Легко скатываются в шарик	При резании ножом в сыром состоянии дают гладкую поверхность, на которой не видно песчинок
Пластичное	Длинного шнура не дают. Шнур при сгибании образует трещины. Скатываются в шарик	То же, но чувствуется присутствие песчинок
Слабо пластичное	Скатываются в шнур. Шарик образует трещины на поверхности и осыпается	При резании ножом в сыром состоянии дают шероховатую поверхность
Непластичное. При незначительном увлажнении обладает небольшой кажущейся связностью. При переувлажнении переходит в текучее состояние	Не скатывается в шнур и шарик	—
—	—	—

40 г. Окончательный отсчет по ареометру R равен 6,5. Подставляя полученные результаты в вышеприведенную формулу, получим

$$X = \left(\frac{2,75}{2,75 - 1} \cdot \frac{90}{40} \right) 6,5 = 14,6\%.$$

11. Вычислить процентное содержание отдельных фракций (см. табл. 5), так как в приведенной выше формуле определяется не процентное содержание отдельных фракций, а содержание фракций по совокупности, начиная с самой мелкой.

12. Построить кривую гранулометрического состава по результатам ареометрического метода в полулогарифмическом масштабе (см. рис. 11).

13. Используя кривую гранулометрического состава, выразить результаты ареометрического анализа в виде таблицы процентного содержания частиц по общепринятым фракциям (см. табл. 5).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Визуальный метод

При массовых определениях для предварительной оценки гранулометрического состава пород применяется визуальный метод (метод Филатова). Достоинством его является простота, быстрота определения и дешевизна. Сущность визуального метода заключается в том, что, используя некоторые физические свойства породы (пластичность, степень прилипания, консистенцию и др.), определяют наименование породы: глина, суглинок, супесь, песок, гравий, без процентного содержания тех или иных фракций.

Проведение анализа

1. Взять на ладонь небольшое количество исследуемой породы, растереть пальцами и рассмотреть в лупу. Пользуясь данными, приведенными в табл. 6 (графы 2—4), сделать предварительное заключение о гранулометрическом составе породы.

2. Используя указания, приведенные в графах 5—7, дать окончательное наименование породе по графе 1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Гранулометрический анализ по методу Рутковского

Гранулометрический анализ по методу Рутковского применяется при массовых определениях гранулометрического состава рыхлых горных пород. Этот метод позволяет грубо разделить породу на три основные фракции: глинистую, пылеватую и песчаную. В основу метода положена способность частиц глинистой фракции набухать в воде и различная скорость оседания в воде частиц различной крупности: частицы более крупные оседают быстрее, а более мелкие — медленнее. Для определения скорости частиц в воде пользуются формулой Стокса, приведенной выше. В этом методе допускается прямая зависимость между величиной набухания и содержанием глинистых частиц в породе. В действительности эта зависимость сложнее в связи с тем, что объем набухшей в воде породы определяется не только количеством частиц

этой фракции, но также их минеральным составом и химическим составом воды.

Этот метод применяется в комбинации с ситовым, при наличии в породе фракций более 1 мм.

Необходимое оборудование: набор сит; технические весы с разновесами; две градуированные мензурки емкостью 120—130 см³ высотой 20—25 см, с делениями через 1 см³; секундомер; стеклянная палочка с резиновым наконечником; фарфоровая ступка и пестик с резиновым наконечником; стеклянная банка объемом 2—3 л; раствор хлористого кальция (концентрация 5,5 г на 100 см³ воды).

Определение содержания частиц песчаных фракций диаметром 1—0,05 мм

1. Образец песчаной породы довести до воздушно-сухого состояния. Если в породе имеются слипшиеся комочки, то поместить ее в фарфоровую ступку и осторожно растереть пестиком с резиновым наконечником.

2. Растертую породу просеять через сито с отверстиями 1 мм.

3. Часть породы, прошедшей через сито с диаметром отверстий 1 мм, высыпать в мензурку емкостью 120—130 см³, высотой 20—25 см в таком количестве, чтобы после уплотнения (постукиванием стеклянной палочкой с резиновым наконечником о стенки мензурки) общий объем породы составил 10 см³ (рис. 7).

4. Разрыхлить породу в мензурке, долить воды до деления 100 см³, тщательно размешать стеклянной палочкой с резиновым наконечником и оставить отстаиваться на 90 с. Время отметить по секундомеру.

5. По истечении 90 с осторожно слить в стеклянную банку 70—75 см³ суспензии так, чтобы уже осевшие на дне частицы не поднялись и не оказались смытыми.

6. Оставшуюся в мензурке суспензию снова долить водой до деления 100 см³, взмутить и слить через 90 с 70—75 см³. Отмучивание суспензии производить до тех пор, пока жидкость не станет почти прозрачной.

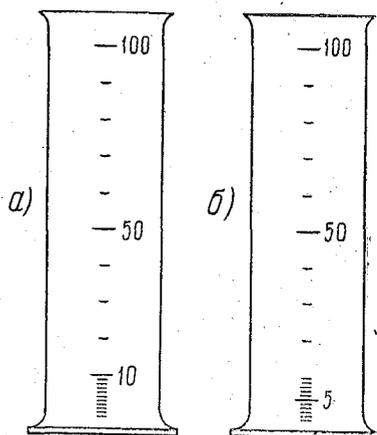


Рис. 7. Градуированные мензурки для гранулометрического анализа по методу Рутковского:

а — для определения песчаной фракции; б — глинистой фракции.

7. Долить в мензурку воды до деления 30 см³, взмутить и через 30 с слить всю жидкость над осадком. Эту операцию повторять неоднократно до полного осветления жидкости.

8. После окончания отмучивания долить мензурку водой до 100 см³, дать отстояться и определить объем осевшей на дно мензурки фракции диаметром 1—0,05 мм.

9. Принимая, что каждый кубический сантиметр осевших частиц соответствует десяти весовым процентам породы, вычислить количество исследуемой фракции, умножив полученный объем осадка на 10. Результаты занести в табл. 7.

Таблица 7

Определение гранулометрического состава методом Рутковского (проба №)

Результаты анализа по методу Рутковского		Результаты ситового анализа					Гранулометрический состав анализа пробы, %							
ф р а к ц и и , м м														
дата	песчаная		глинистая			пылевая				гравий > 2 мм	песок		пыль 0,05—0,005 мм	глина < 0,005 мм
	объем осадка после отмучивания, см ³	%	объем осадка после набухания, см ³	прирост объема на 1 см ³	%	%	> 2	2—1	< 1		> 2 мм	2—1 мм		
18/10.80	5,6	56	8	0,6	13,6	30,4	8	42	50	8	42	28	15,2	6,8

Наименование анализируемой пробы: супесь, тяжелая.

Пример расчета. Для определения содержания фракций диаметром 1—0,05 мм было насыпано в мензурку 10 см³ породы. После отмучивания оставшийся объем породы составил 5,6 см³. Следовательно, фракции диаметром 1—0,05 мм в анализируемой пробе составляют $5,6 \times 10 = 56\%$.

Определение содержания частиц глинистой фракции диаметром менее 0,005 мм

1. Высыпать во вторую мензурку такое количество исследуемой пробы, чтобы после уплотнения, постукиванием стеклянной палочкой с резиновым наконечником о стенки мензурки, получился объем $V_0 = 5 \text{ см}^3$ (см. рис. 7).

2. Разрыхлить породу в мензурке, влить 50—60 см³ воды и растереть стеклянной палочкой с резиновым наконечником до тех пор, пока не исчезнут мазки глины на стенках мензурки.

3. Прибавить в полученную суспензию в качестве коагулятора 2,5—3 см³ хлористого кальция (концентрация 5,5 г CaCl₂ на 100 см³), размешать, долить водой до метки 100 см³ и оставить отстаиваться на 24—48 ч.

4. По истечении указанного времени определить объем набухшей пробы и вычислить прирост объема на 1 см³ первоначального объема по формуле

$$K = \frac{V_1 - V_0}{V_0}, \quad (8)$$

где K — прирост объема на 1 см³ первоначального объема породы; V_1 — объем набухшей породы, см³; V_0 — первоначальный объем породы, см³. Определение рекомендуется производить параллельно в двух мензурках и при расчете брать среднее из двух определений. Расхождение допускается не более 5%. В противном случае анализ необходимо повторить.

5. Определить в пробе содержание глинистых частиц в процентах к весу взятой навески, используя эмпирически установленную зависимость набухания породы от количества содержащихся в ней частиц глинистой фракции (табл. 8). Эта зависимость выражается формулой

$$X = 22,7 K,$$

где X — содержание глинистых частиц, %; K — прирост объема на 1 см³ первоначально взятого объема породы.

Полученные результаты расчета занести в табл. 7.

Пример расчета. Для определения содержания глинистой фракции диаметром менее 0,005 мм было насыпано в мензурку $V_0 = 5$ см³ анализируемой пробы. После отстаивания объем набухшей пробы составил $V_1 = 8$ см³. Таким образом, прирост объема составил 3 см³. Прирост же объема на 1 см³ будет равен

$$K = \frac{V_1 - V_0}{V_0} = \frac{3}{5} = 0,6.$$

Согласно табл. 8 приросту объема 0,6 соответствует содержание глинистых частиц 13,6%.

Таблица 8

Зависимость набухания песчано-глинистых пород от количества глинистых частиц

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

Определение содержания пылевой фракции диаметром 0,05—0,005 мм

1. Определив процентное содержание песчаной и глинистой фракций, вычтешь из 100% их сумму. Полученный результат составит процентное содержание в анализируемой пробе пылевой фракции диаметром 0,05—0,005 мм.

2. Если гранулометрический состав анализируемой пробы определяется методом Рутковского в комбинации с ситовым методом, при наличии в породе фракций диаметром более 1 мм, следует сделать пересчет полученных результатов методом Рутковского на всю навеску. Окончательные результаты внести в табл. 7 и дать название анализируемой пробе по трехчленной классификации (см. табл. 10).

Пример. Ситовым анализом определено следующее содержание крупных фракций: >2 мм содержится 8%, 2—1 мм — 42%, следовательно, на долю фракций <1 мм приходится 50%.

Для пересчета составляем следующие пропорции:

$$\text{— для песка } 100 : 56 = 50 : X \quad X = \frac{56 \cdot 50}{100} = 28\%;$$

$$\text{— для глины } 100 : 13,6 = 50 : X \quad X = \frac{13,6 \cdot 50}{100} = 6,8\%;$$

$$\text{— для пыли } 100 : 30,4 = 50 : X \quad X = \frac{30,4 \cdot 50}{100} = 15,2\%.$$

Таким образом, всей анализируемой пробе соответствует следующий гранулометрический состав:

— фракций диаметром >2 мм	8%;
— фракций диаметром 2—1 мм	42%;
— фракций диаметром 1—0,05 мм	28%;
— фракций диаметром 0,05—0,005 мм	15,2%;
— фракций диаметром <0,005 мм	6,8%;
	<hr/>
	100,0%.

СПОСОБЫ ГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОД

Результаты гранулометрических анализов, представленные в виде таблиц, как было показано выше, не дают наглядного представления о составе породы. Поэтому в гидрогеологической практике принято результаты таких анализов изображать в виде различных графиков, диаграмм, треугольников.

Диаграммы гранулометрического состава породы (рис. 8) позволяют показать результаты только одного анализа, поэтому при проведении массовых анализов этот способ графического изображения неудобен. Он может быть, например, применен для изображения гранулометрического состава типичных разностей какого-то водоносного горизонта.

Треугольные диаграммы, применяемые для изображения результатов гранулометрического состава пород, можно использовать как при единичных, так и при массовых анализах.

При построении треугольных диаграмм использовано свойство равностороннего треугольника, заключающееся, как известно, в том, что сумма перпендикуляров, опущенных из какой-либо точки внутри треугольника на его стороны, равна его высоте. Поэтому, если высоту треугольника (или его стороны) разделить на 100 равных частей и провести через них параллельные линии, перпендикулярные высоте, а на сторонах треугольника показать содержание трех основных фракций (для глинистых пород — глинистой, пылеватой, песчаной; для песчаных — грубо- и крупнозер-

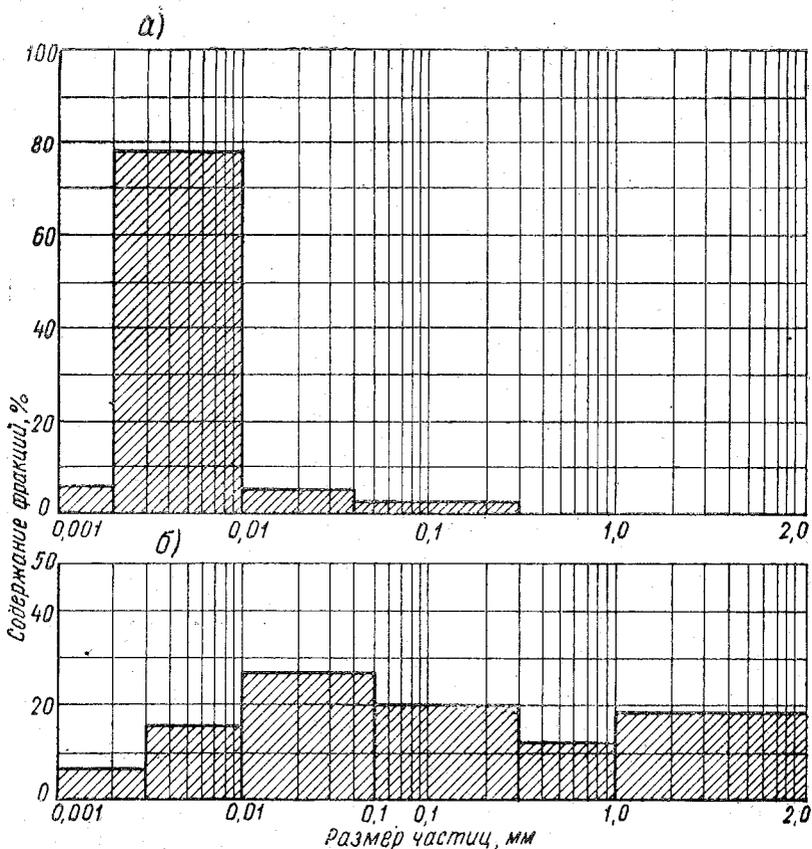


Рис. 8. Диаграммы гранулометрического состава пород:
 а — однородной; б — неоднородной

нистой, средне- и мелкозернистой), то можно изобразить точками в треугольнике состав породы (рис. 9). Причем степень однородности породы легко определяется тем, как располагаются точки в треугольнике: если они разбросаны, — порода неоднородна, если концентрируются в определенных местах, — однородна.

Например, на рис. 9 точка 1 показывает, что в породе содержится песчаных фракций 15%, пылеватых — 20% и глинистых — 65%, точка 2 показывает соответственно 45,5% песчаных, 20% пылеватых, 34,5% глинистых.

Наиболее распространенным способом графического изображения состава пород являются кривые однородности, построенные в прямоугольной системе координат в простом (рис. 10) или полулогарифмическом масштабе (рис. 11).

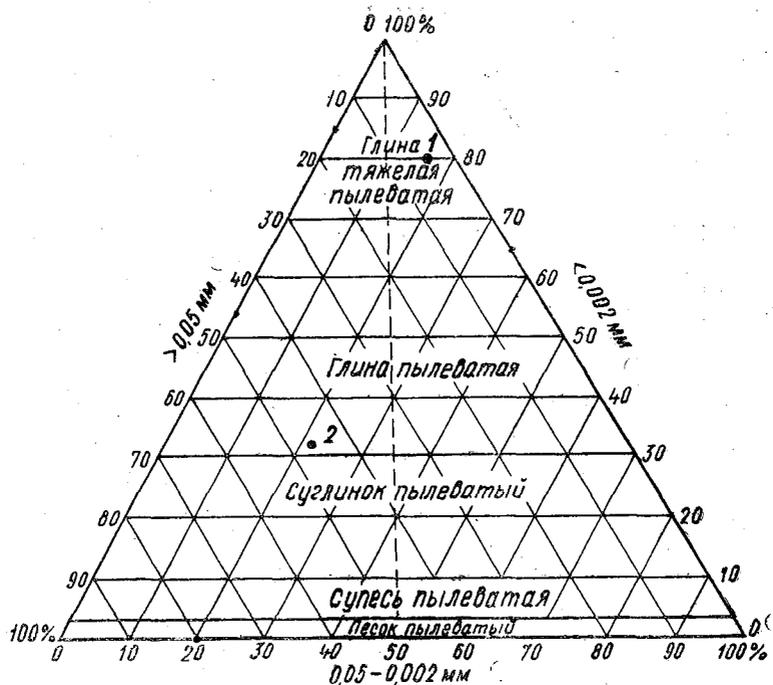


Рис. 9. Треугольная диаграмма для изображения гранулометрического анализа

При построении кривых однородности результаты анализов пересчитывают по совокупности фракций, суммируя их, начиная с самой мелкой (см. рис. 11).

При построении кривой однородности в простом масштабе на оси абсцисс откладываются диаметры частиц в мм, а на оси ординат — процентное содержание фракций.

При построении кривой однородности в полулогарифмическом масштабе, на оси абсцисс показан не размер частиц в миллиметрах, а отрезки, пропорциональные логарифмам этих величин. Для

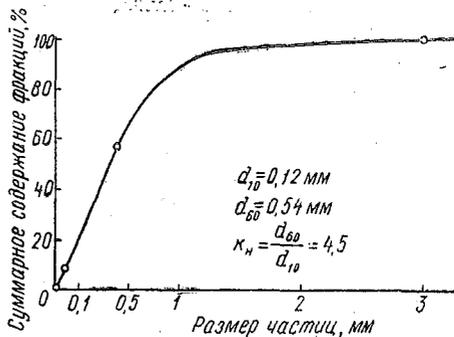


Рис. 10. Кривая гранулометрического состава породы в простом масштабе

построения шкалы сначала выбирают длину отрезка, соответствующую $\lg 10$. Это могут быть отрезки любой величины: 2, 4, 5 и т. д. сантиметров. В начале координат ставится минимальный

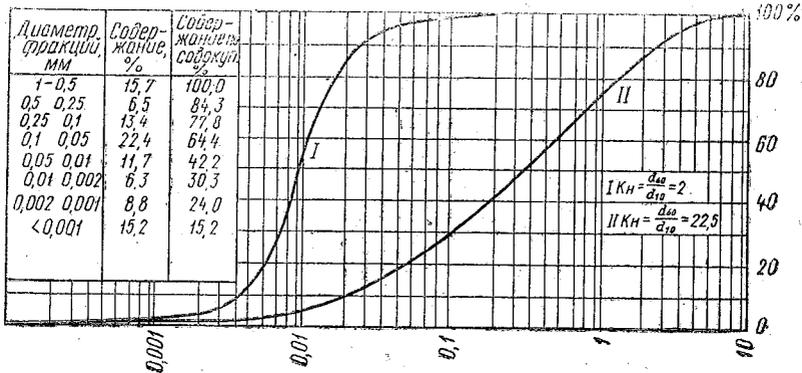


Рис. 11. Кривые гранулометрического состава пород в полулогарифмическом масштабе:

I — однородный; II — неоднородный

диаметр — 0,0001 или 0,001 мм, а через отрезок, соответствующий $\lg 10$, последующие метки — 0,01; 0,1; 1; 10 и т. д. Например, если $\lg 10=1$ будет соответствовать отрезку длиной 5 см, то отрезки всех последующих чисел будут равны численному значению логарифма данного числа, умноженному на 5, т. е.

$$\begin{aligned} \lg 2 &= 0,301 \times 5 = 1,5 \text{ см}; & \lg 6 &= 0,778 \times 5 = 3,9 \text{ см}; \\ \lg 3 &= 0,477 \times 5 = 2,3 \text{ см}; & \lg 7 &= 0,845 \times 5 = 4,2 \text{ см}; \\ \lg 4 &= 0,602 \times 5 = 3,0 \text{ см}; & \lg 8 &= 0,903 \times 5 = 4,5 \text{ см}; \\ \lg 5 &= 0,699 \times 5 = 3,5 \text{ см}; & \lg 9 &= 0,954 \times 5 = 4,8 \text{ см}. \end{aligned}$$

Откладывая на оси абсцисс от начала координат длину каждого вычисленного отрезка, ставят метку и соответствующую ему величину. Например, в первом интервале 0,002; 0,003; 0,004; и т. д., во втором — 0,02; 0,03 и т. д.

По оси ординат откладывают процентное содержание фракций по совокупности (см. рис. 11). Полученные точки соединяют плавной линией и получают кривую однородности в полулогарифмическом масштабе. Такие кривые удобны тем, что, во-первых, дают возможность судить о степени однородности породы: крутая кривая указывает на однородность исследуемой породы, пологая — на ее неоднородность. Во-вторых, позволяют получить численный коэффициент неоднородности, который равен

$$K_n = \frac{d_{60}}{d_{10}},$$

где d_{10} — действующий или эффективный диаметр частиц, мм;
 d_{60} — контролирующий диаметр частиц, мм.

Под действующим или эффективным диаметром понимают такой диаметр частиц, меньше которого в породе содержится 10% от всех частиц. Определяется он по кривой гранулометрического состава следующим образом: из точки на оси ординат, соответствующей 10%, проводится линия до пересечения с кривой. Из точки пересечения опускается перпендикуляр на ось абсцисс, где читается размер действующего или эффективного диаметра в миллиметрах.

Контролирующий диаметр — это такой диаметр частиц, меньше которого в породе содержится 60% частиц. Определяют его также по кривой однородности. При коэффициенте неоднородности глинистых пород больше 5, а песчаных больше 3, они считаются неоднородными.

Коэффициент неоднородности дает возможность судить о водопроницаемости однородных и неоднородных по гранулометрическому составу пород и является критерием для применения в гидрогеологических исследованиях некоторых расчетных формул.

По кривой гранулометрического состава можно также определить процентное содержание фракций любого диаметра в породе, и наоборот, найти диаметр частиц, соответствующий определенному процентному содержанию фракций.

КЛАССИФИКАЦИИ РЫХЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Многочисленное количество данных, получаемых в процессе изучения горных пород и систематизированных лишь в таблицах, диаграммах, графиках, не смогло бы создать полного представления о физико-механических свойствах пород, если бы они не были классифицированы. Классификации рыхлых горных пород позволяют привести в стройную систему представления об их физико-механических и физико-химических свойствах.

Соотношения частиц различных фракций положены в основу классификаций рыхлых горных пород по гранулометрическому составу.

В гидрогеологических исследованиях наиболее часто применяются двучленные и трехчленные классификации.

Двучленные классификации основаны на относительном содержании в рыхлых горных породах частиц двух фракций: размером менее 0,01 мм, называемых «физической глиной», и более 0,01 мм — «физическим песком». По процентному содержанию частиц фракций менее 0,01 мм в двучленных классификациях определяется название породы — глины, суглинки, супеси, пески и т. д. (табл. 9).

Таблица 9

Двучленная классификация горных пород по гранулометрическому составу

Наименование породы	Содержание фракций, %	
	$d > 0,01$ мм	$d < 0,01$ мм
Песок	100—95	0—5
Супесь	95—85	5—15
Суглинок легкий	85—75	15—25
Суглинок средний	75—65	25—35
Суглинок тяжелый	65—50	35—50
Глина легкая	50—30	50—70
Глина тяжелая	< 30	> 70

Недостатком двучленных классификаций является то, что в них не учитываются содержания частиц глинистых и пылеватых фракций, присутствие которых в рыхлых горных породах резко

Таблица 10

Трехчленная классификация пород по гранулометрическому составу

Наименование породы	Содержание частиц, %		
	$d < 0,005$ мм	$d = 0,005 \div 0,1$ мм	$d = 0,1 \div 2$ мм
1	2	3	4
Глина тяжелая	> 50	—	—
Глина легкая	30 ÷ 50	—	Больше чем пылеватых
Глина легкая пылеватая	30 ÷ 50	Больше чем песчаных и глинистых отдельно взятых	—
Суглинок тяжелый	30 ÷ 20	—	Больше чем пылеватых
Суглинок тяжелый пылеватый	30 ÷ 20	Больше чем песчаных	—
Суглинок средний	20 ÷ 15	—	Больше чем пылеватых
Суглинок средний пылеватый	20 ÷ 15	Больше чем песчаных	—
Суглинок легкий	15 ÷ 10	—	Больше чем пылеватых
Суглинок легкий пылеватый	15 ÷ 10	Больше чем песчаных	—
Супесь тяжелая	10 ÷ 6	—	Больше чем пылеватых
Супесь тяжелая пылеватая	10 ÷ 6	Больше чем песчаных	—
Супесь легкая	6 ÷ 3	—	Больше чем пылеватых
Супесь легкая пылеватая	6 ÷ 3	Больше чем песчаных	—
Песок	< 3	до 20	—
Песок пылеватый	< 3	20—50	—
Пыль	< 3	> 50	—

меняет их водные свойства. Поэтому в современных гидрогеологических исследованиях они не применяются.

Этот недостаток устранен принятой в СССР трехчленной классификацией (табл. 10). Она основана на относительном содержании в рыхлых горных породах трех основных фракций: глинистой (менее 0,005 мм), пылеватой (0,005—0,1 мм) и песчаной (0,1—2,0 мм), и применяется как классификация, утвержденная ГОСТом.

Использование трехчленной классификации дает возможность по содержанию глинистой фракции детализировать рыхлые горные породы, выделяя в них две разновидности глин и супесей (тяжелые и легкие), а также три вида суглинков (тяжелый, средний и легкий). Соотношение пылеватой и песчаной фракций позволяет также выделить среди них еще и пылеватые разности.

Определение названия породы по трехчленной классификации рассмотрим на примере.

Пример

По данным гранулометрического анализа, определенного ситовым и пипеточным (или ареометрическим) методами, в породе содержится: песчаных фракций, диаметром от 2 до 0,1 мм — 15,5%, пылеватых фракций, диаметром от 0,1 до 0,005 мм — 56,0% и глинистых, диаметром менее 0,005 мм — 28,5%. Пользуясь табл. 10, сначала по содержанию глинистых фракций (графа 2), определяем общее название породы (графа 1). Это будет либо суглинок тяжелый, либо суглинок тяжелый пылеватый. Далее смотрим по графе 3 и 4, содержание пылеватых фракций в нашем примере больше чем песчаных. Следовательно, исследуемая порода называется суглинок тяжелый пылеватый.

В дополнение к приведенной трехчленной классификации существует в СССР классификация рыхлых горных пород, содержащих примесь крупнообломочных фракций, диаметром более 2 мм, и песков (табл. 11).

Поэтому, если по трехчленной классификации дано определение анализируемой породы *песок*, то по табл. 11 необходимо уточнить, какой песок — *крупный*, *среднезернистый*, *мелкий* или *разнозернистый*. Если породы (глина, супесь, суглинок) содержат фракции диаметром более 2 мм, то нужно также по этой таблице дать уточнение: порода с гравием или порода гравелистая.

Классификация крупнообломочных рыхлых горных пород

№ п/п	Название породы	Содержание частиц
1	Галечник (или щебень, если обломки остроугольные)	Содержание обломков $d > 10$ мм более 50% по весу
2	Гравий (или хрящ, если частицы остроугольные)	Содержание частиц d от 2 до 10 мм более 33% по весу
3	Грунт гравелистый (песок, су- песь и т. д.)	Содержание частиц d от 2 до 10 мм от 10 до 33% по весу
4	Грунт с гравием	Содержание частиц d от 2 до 10 мм менее 10% по весу
5	Песок крупнозернистый	Содержание частиц $d > 0,5$ мм более 50% по весу
6	Песок среднезернистый	Содержание частиц $d > 0,25$ мм более 50% по весу
7	Песок мелкозернистый	Содержание частиц $d > 0,1$ мм более 75% по весу
8	Песок разнозернистый	Если песчаные фракции содержатся в одинаковой пропорции или близко к этому, при условии, что содержание отдельных фракций отличается не более, чем на 5% одна от другой

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломтадзе В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. Л., изд-во «Недра», 1972.
2. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. Л., изд-во «Недра», 1966.

Приложение

Инструкция по тарировке ареометра *

При определении гранулометрического состава глинистой породы ареометрическим методом для вычисления диаметра частиц пользуются особой номограммой (см. рис. 6), значительно упрощающей расчеты. Так как сделать все ареометры совершенно одинаковыми невозможно, то одному и тому же отсчету R по разным ареометрам будет соответствовать различное расстояние H_R : от поверхности жидкости до центра водоизмещения ареометра. Поэтому правая сторона прямой № 4 номограммы — шкала R наносится в лаборатории для каждого ареометра отдельно. Для того чтобы нанести эту шкалу, надо для каждого отсчета по ареометру

* Инструкция заимствована из книги В. Д. Ломтадзе (1972).

(для каждого тысячного деления) подсчитать соответствующее ему значение H_R .

Подсчет производят по формуле

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

где H_R — расстояние от данного деления шкалы ареометра до центра его водоизмещения (см), или путь, проходимый частицами суспензии от поверхности до центра водоизмещения ареометра при погружении его в суспензию, которая имеет удельный вес, отвечающий данному делению шкалы (величина переменная — своя для каждого показания ареометра); N — число тысячных делений на шкале ареометра от нижнего деления, т. е. 1,030 до деления 1,000 (величина постоянная для данного ареометра); M — число тысячных делений на шкале ареометра от деления 1,000 до поверхности суспензии (величина переменная, зависящая от погружения ареометра), M всегда равно R ; l — длина шкалы ареометра от нижнего деления шкалы ареометра, т. е. от 1,030 до деления 1,000, см (величина постоянная для данного ареометра); a — расстояние от нижнего деления ареометра, т. е. от 1,030 до центра водоизмещения луковичи ареометра, см (величина постоянная для данного ареометра); b — высота поднятия воды в цилиндре при погружении ареометра до центра водоизмещения луковичи ареометра, см.

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

где V_0 — объем луковичи ареометра до нижнего деления на шкале ареометра, т. е. до 1,030; F — площадь сечения цилиндра, в котором производят анализ (длина диаметра должна быть 6 см с точностью до ± 1 мм).

В формуле выражение $(a-b)$ является постоянным для данного ареометра, а при расчете лишь изменяется выражение для $\frac{N-M}{N}$, так как мы даем различные значения для M , причем выражение $\frac{N-M}{N} \cdot l$ должно рассчитываться с точностью до 0,001.

Определение величин H_R , отвечающих делениям шкалы для данного экземпляра ареометра, заносят в таблицу тарировки и производят следующим образом.

Определение V_0 . Сначала определяют V_0 — объем луковичи ареометра до нижнего деления на шкале ареометра, т. е. до 1,030. Для этого в мерный цилиндр на 1000 см³ диаметром 6 см (± 1 мм), градуированный с точностью до 10 см³, наливают от 900

до 920 см^3 (по нижнему краю мениска цилиндра) дистиллированной воды, имеющей температуру 20°C . Погружают ареометр до деления $1,030$ (по верхнему краю мениска) и записывают увеличение объема, отвечающее подъему уровня воды в цилиндре (по нижнему краю мениска цилиндра), при ареометре, погруженном до деления $1,030$. Это и есть объем луковицы ареометра (в см^3), т. е. V_0 .

Пример. Количество воды в цилиндре без ареометра равно 900 см^3 , количество воды в цилиндре с погруженным в нее ареометром равно 967 см^3 . Следовательно,

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

О п р е д е л е н и е *a*. Получив объем луковицы, вычисляют половину этого объема и вновь опускают ареометр в цилиндр, но уже не до деления $1,030$, а до подъема уровня воды в цилиндре, отвечающего увеличению объема воды на величину половины объема луковицы $\frac{V}{2}$, т. е. при погружении ее до центра водоизмещения. Не вынимая ареометра и строго сохраняя его погружение до половины объема, замеряют миллиметровой линейкой расстояние (в см) от поверхности воды до нижнего деления на шкале ареометра, т. е. до $1,030$. Таким образом получают величину *a*.

П р и м е р

$$V_0 = 67 \text{ см}^3; \frac{V_0}{2} = 33,5 \text{ см}^3; 900 \text{ см}^3 + 33,5 \text{ см}^3 = 933,5 \text{ см}^3.$$

Погружают ареометр так, чтобы вода поднялась до $933,5$, и от этого уровня замеряют линейкой расстояние до $1,030$ на шкале ареометра; пусть оно равно $10,5$ см. Таким образом, $a = 10,5$ см.

О п р е д е л е н и е *l*. Прикладывая линейку к шкале ареометра от нижнего деления, т. е. от $1,030$ до $1,000$, получают величину *l* (в см) (например, $10,35$ см).

О п р е д е л е н и е *N*. *N* — число постоянное, и для ареометра с нижним делением $1,030$ оно равно 30 .

О п р е д е л е н и е *b*. *b* замеряют линейкой или вычисляют по формуле

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

получают подсчетом по формуле площади круга

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

где d — внутренний диаметр мерного цилиндра, в котором производится анализ и тарировка; $d=6$ см (± 1 мм).

Определение M . M — число переменное, соответствующее числу тысячных делений на шкале ареометра, находящихся над уровнем суспензии до деления 1,000 в зависимости от погружения ареометра. M всегда равно R . Например, при следующих показаниях ареометра M и R будут:

Показания ареометра	M, R	Показания ареометра	M, R
1000	0	1008	8
1001	1	1007	17
1005	5	1021	21
		1030	30

Взяв значение M для каждого тысячного деления всей шкалы ареометра от 1,000 до 1,030 мм, подставив их в формулу и сделав вычисления, получают H_R для каждого возможного отсчета R от 1,000 до 1,030, или величины путей, проходимых частицами при любом погружении ареометра. Полученные данные заносят в таблицу тарировки. Таким образом, в результате получают значения H_R и R . Взяв по таблице значения R , отвечающие величинам H_R , имеющимся на левой стороне прямой, наносят их на правую сторону этой прямой против соответствующих значений H_R и получают рабочую номограмму для данного ареометра в готовом виде.

После нанесения шкалы R шкалой H_R больше не пользуются.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Физико-механические свойства рыхлых горных пород	3
Основные фракции и их характеристики	5
Гранулометрический состав горных рыхлых пород и методы его определения	7
Лабораторная работа № 1. <i>Ситовой метод</i>	8
Лабораторная работа № 2. <i>Пипеточный метод</i>	11
Лабораторная работа № 3. <i>Ареометрический метод</i>	16
Лабораторная работа № 4. <i>Визуальный метод</i>	24
Лабораторная работа № 5. <i>Гранулометрический анализ по методу Рутковского</i>	24
Способы графического изображения гранулометрического состава горных пород	29
Классификация рыхлых горных пород	33
Литература	36
Приложение	36

ИННА ВЛАДИМИРОВНА БОЛОТНИКОВА

Лабораторные работы по курсу «Гидрогеология»

Редактор *Т. В. Иващенко*

Корректор *Р. В. Федорова*

Сдано в набор 18.11.80. Подписано к печати 29.04.82. Формат бумаги 60×90¹/₁₆.
Бумага тип. № 2. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,7.

Тираж 600 экз. Заказ № 763. Бесплатно

ЛГМИ. 195196, Ленинград, Малоохтинский пр. д. 98.

Типография ВВМУПП им. Ленинского комсомола