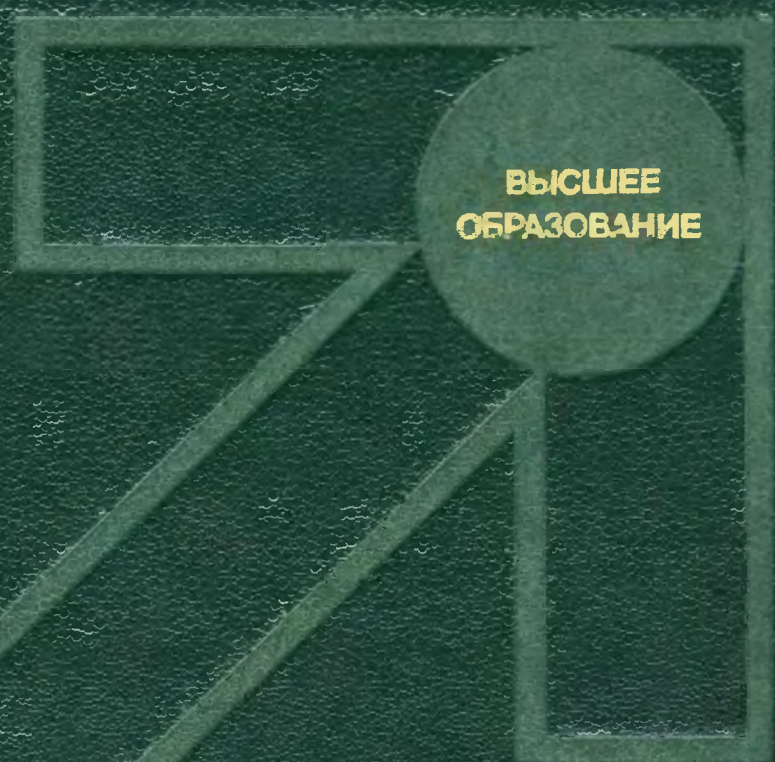


В. Д. Ломтадзе

**ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА
ГОРНЫХ ПОРОД
МЕТОДЫ ЛАБОРАТОРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**



**ВЫСШЕЕ
ОБРАЗОВАНИЕ**

551.2
1 756

В. Д. ЛОМТАДЗЕ

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-Е ИЗДАНИЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

*Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию в качестве учебного
пособия для студентов геологических
специальностей вузов*

002495



ЛЕНИНГРАД
«НЕДРА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1990



ББК 26.3
Л 74
УДК 624.131.37(07)

Рецензент кафедры инженерной геологии и грунтоведения Ленинградского государственного университета

Ломтадзе В. Д.
Л 74 Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: Учебное пособие для вузов.— 2-е изд., перераб. и доп.— Л.: Недра, 1990.— 328 с.: ил.
ISBN 5—247—01375—1

Детально описаны современная методика, приборы и оборудование, применяемые для изучения физико-механических свойств горных пород при инженерно-геологических исследованиях. При этом большое внимание уделено организации, рациональной последовательности проведения исследований и обработки их результатов. Приведена методика установления обобщенных и расчетных показателей физико-механических свойств горных пород.

В отличие от первого издания (Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. Руководство к лабораторным занятиям по инженерной геологии. 1972), единицы физических величин даны в СИ.

Является учебным пособием для лабораторных занятий по инженерной геологии для студентов геологических специальностей вузов.

Л 1804090000—311
043(01)—90 126—90

ББК 26.3

ISBN 5—247—01375—1

© Издательство «Недра», 1990

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторные занятия являются обязательной и весьма важной составной частью учебного процесса по изучению инженерной геологии (первой части курса — инженерной петрологии) студентами специальности «Гидрогеология и инженерная геология» высших учебных заведений.

В первой части курса инженерной геологии студенты знакомятся с природой физико-механических свойств горных пород, т. е. со всеми теми процессами, которые обусловили их физическое состояние, отношение к воде и закономерности изменений прочности и деформируемости. При этом рассматривается влияние на свойства горных пород условий их образования, условий залегания, состава, строения (структуры и текстуры), трещиноватости, выветрелости, напряженного состояния и других факторов. В задачи инженерной геологии (инженерной петрологии) также входят прогноз изменения свойств горных пород под влиянием строящихся сооружений и других инженерных работ, разработка методов их искусственного улучшения и методов инженерно-геологического изучения.

Для успешного освоения теоретического материала о физической сущности природы свойств горных пород, причин и факторов, обуславливающих их изменения, учебным планом и программой предусмотрены самостоятельные занятия студентов в лаборатории. На лабораторных занятиях студенты знакомятся с современными методами, приборами и оборудованием, применяемыми при изучении физико-механических свойств горных пород для строительных целей. При этом большое внимание обращается на организацию, рациональную последовательность проведения исследований и оценку получаемых результатов. В лабораторный практикум входят работы по исследованию всех основных свойств горных пород, используемых при проектировании и строительстве различных сооружений (в том числе шахт и карьеров), и по оценке их устойчивости. Завершающей частью лабораторных занятий является знакомство с методами обработки результатов лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород, с методами установления обобщенных и расчетных показателей.

Предлагаемое второе издание составлено применительно к действующим ГОСТ, Строительным нормам и правилам. В отличие от первого издания (1972 г.), во втором уточнены некоторые методы исследований свойств горных пород, приве-

дено описание новых приборов и установок; единицы показателей свойств горных пород даны в системе СИ. Сбор, обработка и анализ результатов исследований предполагают использование автоматизированных средств. Поэтому даются указания по подготовке исходных материалов к использованию современной вычислительной техники (ЭВМ), по приемам выполнения соответствующих операций и анализа результатов.

Методика и порядок выполнения лабораторных исследований свойств горных пород даны в пособии с расчетом на значительное повышение самостоятельности работы каждым студентом. В зависимости от объема курса инженерной геологии, читаемого в вузе или на факультете, а также от возможностей лабораторной базы вуза в план проведения лабораторных занятий могут быть включены либо все работы, либо часть из них. Состав лабораторных работ в пособии предусматривает также возможность занятий студентов, обучающихся по индивидуальным учебным планам.

Книга может служить полезным руководством и для широкого круга инженерно-технических работников производственных и научных лабораторий, занимающихся изучением физико-механических свойств горных пород.

Автор будет благодарен за все пожелания и замечания, которые просит присылать по адресу: 199026, Ленинград, В-26, 21-я линия, д. 2, Горный институт, кафедра инженерной геологии.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

§ 1. ПОНЯТИЯ О ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ГОРНЫХ ПОРОД

Физико-механическими свойствами горных пород следует называть такие, которые определяют их физическое состояние, отношение к воде и закономерности изменения прочности и деформируемости. Различают физические, водные и механические свойства. Их выражают и оценивают с помощью определенных показателей — характеристик.

Физические свойства характеризуют физическое состояние горных пород, т. е. качественную определенность, проявляющуюся в их плотности, влажности, пористости, консистенции, трещиноватости и выветрелости в условиях естественного залегания, а также в земляных сооружениях и отвалах. Данные о них позволяют качественно оценивать прочность и устойчивость горных пород.

Водные свойства горных пород проявляются в их способности изменять состояние, прочность и устойчивость при взаимодействии с водой, поглощать и удерживать воду или фильтровать ее. Зная водные свойства горных пород, можно делать прогноз изменения их прочности и других свойств, а также развития каких-либо геологических процессов под воздействием воды. Некоторые показатели водных свойств пород непосредственно используются при различных инженерных расчетах, например при расчетах потерь воды на фильтрацию, притока воды к строительным котлованам и водозаборам, параметров водопонижительных установок, при оценке возможности развития суффозионных процессов и др.

Механические свойства горных пород определяют их поведение под влиянием внешних усилий — нагрузок. Они проявляются и непосредственно оцениваются прочностью и деформируемостью горных пород. Показатели механических свойств используются при различных инженерных расчетах, например при расчете осадок сооружений по величине и во времени, устойчивости откосов и естественных склонов, при определении давления горных пород на подпорные сооружения или крепи подземных выработок и т. д.

Исследования физико-механических свойств горных пород имеют не только инженерное значение, но и общее геологическое. Эти исследования позволяют расширить геологическую изученность пород, так как отражают те изменения, которые горные породы претерпели в истории геологического развития под влиянием процессов выветривания, гравитационного и гео-

химического уплотнения, тектонических сил и т. д. Физико-механические свойства контролируют распространение и распределение в горных породах различных видов рудной минерализации, метаморфизма углей, коллекторов нефти и газа.

§ 2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Естественным геологическим признаком для подразделения различных горных пород, слагающих земную кору, является их происхождение. В соответствии с этим выделяют изверженные, метаморфические, осадочные и техногенные горные породы. Каждый из этих генетических типов достаточно обособлен и обладает рядом только ему присущих характерных признаков и свойств. Важнейшие из них — минеральный состав, структура, текстура, условия залегания, физическое состояние и физико-механические свойства — являются прямым следствием условий образования горных пород и последующего преобразования в земной коре. По этим генетическим признакам представляется возможным выделить большое число петрографических типов горных пород.

Различные генетические и петрографические типы пород могут быть объединены в определенные группы по физико-механическим свойствам (табл. I-1). Последние позволяют каждой выделенной группе давать определенную характеристику строительных качеств, например прочности, деформируемости, устойчивости и водопроницаемости. Таким образом можно выделить следующие пять групп горных пород по физико-механическим свойствам.

I. Породы твердые — скальные.

II. Породы относительно твердые — полускальные.

III. Породы рыхлые несвязные.

IV. Породы мягкие связные.

V. Породы особого состава, состояния и свойств.

В этом инженерно-геологическом подразделении горных пород на группы наблюдается изменение их строительных качеств от первой группы к пятой, исчезновение одних признаков и свойств и появление новых.

Скальные породы наиболее совершенны в инженерно-строительном отношении. Они характеризуются высокой прочностью и устойчивостью, малой деформируемостью и слабой водопроницаемостью. Участки, сложенные скальными породами, наиболее благоприятны для строительства любых сооружений без существенных ограничений и часто без применения сложных мероприятий для обеспечения их устойчивости.

Полускальные породы отличаются от скальных меньшей прочностью и устойчивостью, большей деформируемостью, зна-

чительной или высокой водопроницаемостью. Они часто трещиноваты, а растворимые породы кавернозны, хотя и имеют высокую прочность в образце. Такие породы обычно отличаются большой неоднородностью и анизотропностью. Участки их распространения в большинстве случаев благоприятны для строительства различных, и в том числе ответственных, сооружений, но нередко с соблюдением определенных ограничений и применением сложных инженерных мероприятий для обеспечения устойчивости сооружений и нормальных условий их эксплуатации.

Следует заметить, что термины «скальные» и «полускальные» породы — производственные, они в сжатой форме выражают строительные свойства пород и предполагают определенные условия строительства на них сооружений.

Породы рыхлые несвязные и мягкие связные по сравнению со скальными и полускальными характеризуются значительно меньшей прочностью и устойчивостью и большей деформируемостью. Некоторые из них сильно водопроницаемы. Эти группы охватывают разнообразные генетические типы осадочных пород, главным образом четвертичного возраста. Они отличаются большой изменчивостью физического состояния и свойств. Условия строительства сооружений на таких породах часто сопряжены с большими ограничениями.

Породы особого состава, состояния и свойств являются, как правило, слабыми в строительном отношении. При выборе мест для расположения сооружений по возможности стараются избегать участков, сложенных такими породами.

Таким образом, инженерно-геологическая классификация горных пород должна основываться на учете генетических и петрографических особенностей пород и их физико-механических свойств. Различные генетические и петрографические типы горных пород в ней должны подразделяться на группы, существенно различающиеся по своим строительным качествам. Такая классификация и представлена в табл. I-1.

§ 3. О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Изучение физико-механических свойств горных пород необходимо при проектировании и строительстве различных сооружений, разработке месторождений полезных ископаемых, при оценке условий развития геологических процессов и их влияния на устойчивость местности и существующих сооружений. Однако следует иметь в виду, что физико-механические свойства горных пород в образце всегда существенно отличаются от их свойств в условиях естественного залегания. В условиях естественного залегания породы, как правило, более неодно-

Таблица I-1. Инженерно-геологическая классификация горных пород (по

Группа	Генетиче				
	Магматические			Метаморфические	
	Глубинные — интрузивные	Полуглубинные и жильные	Излившиеся — эффузивные	Массивные	Сланцеватые
I Твердые — скальные	Граниты, сиениты, гранодиориты, габбро	Гранит-порфиры, сиенит-порфиры, гранодиорит-порфиры, диорит-порфиры, габбро-порфиры	Кварцевые и бескварцевые порфиры и порфириты, диабазы, липариты, трахиты, дациты, андезиты, базальты	Мраморы, кварциты	Гнейсы, кристаллические сланцы
II Относительно твердые — полускальные	Выветрелые, сильно трещиноватые и закарстованные горные породы I группы, имеющие пониженные показатели физико-механических свойств				
III Рыхлые несвязные	—	—	—	—	—
IV Мягкие связные	—	—	—	—	—

ские типы

Осадочные				Техногенные	
Пирокластические	Обломочные	Глинистые	Органогенные и хемогенные	Искусственно улучшенные	Искусственно преобразованные
—	Песчаники и конгломераты с прочным цементом	—	Известняки и доломиты плотные и прочные	Породы I группы, уплотненные и укрепленные цементацией	Породы II группы, преобразование в скальные путем уплотнения и укрепления цементацией
Вулканические туфы, туффиты и туфогенные породы	Песчаники, конгломераты и алевролиты с глинистым цементом	Глинистые сланцы, аргиллиты	Известняки и доломиты глинистые, мергели, мел, кремнистые породы	Породы II группы, уплотненные или укрепленные цементацией, глинизацией, битумизацией или другими способами	Породы III и IV групп, преобразованные до состояния полускальных путем уплотнения и укрепления цементацией, силикатизацией, синтетическими смолами или битумами; глинистые породы, закрепленные термической обработкой или силикатизацией (лёссовые породы)
—	Пески, гравий, галечники, щебнистые породы	—	—	Породы III группы, уплотненные и закрепленные путем осушения, трамбования, укатки, виброуплотнения, битумизации или гранулометрическими добавками	
—	—	Глины, суглинки, супеси, лёссовые породы	—	Породы IV группы, уплотненные и закрепленные трамбованием, укаткой, электроосмотическим осушением, электрохимическим закреплением и другими способами	

Продолжение табл. I-1

Группа	Генетиче				
	Магматические			Метаморфические	
	Глубин- ные — интрузивные	Полуглубинные и жильные	Излившиеся — эффузивные	Массивные	Сланцеватые
V Породы особого состава, состояния и свойств	—	—	—	—	—
Мерзлые породы, резко изменяющие прочность,					

Продолжение табл. I-1

Группа	Физико-мех		
	Физические		Водные
I	Плотность высокая (2,65—3,10 г/см³), пористость незначительная — доли процента, редко больше Плотность средняя (2,20—2,65 г/см³), пористость до 10—15 %, у отдельных разностей выше. Сквозность изменяется в широких пределах		Невлагоемкие, практически нерастворимые, водопроницаемы только по трещинам. Коэффициент фильтрации не превышает 10 м/сут, удельное водопоглощение $\omega < 5$ л/мин Слабовлагоемкие. Водопроницаемость изменяется в зависимости от трещиноватости и выветрелости, коэффициент фильтрации изменяется от 0,5 до 30 м/сут (ω до 15 л/мин) у слабо- и средневодопроницаемых и более 30 м/сут ($\omega > 15$ л/мин) у сильноводопроницаемых

ские типы

Осадочные				Техногенные	
Пирокластические	Обломочные	Глинистые	Органо-генные и хемогенные	Искусственно улучшенные	Искусственно преобразованные
—	Пески-песчаны, песчаные илы	Глинистые породы засоленные, глинистые илы	Торфы, почвы, гипсы, ангидриты, каменная соль	Искусственно отсыпанные, состоящие из отходов промышленного и строительного производства, из смеси отходов производства и бытовых отходов; породы планомерно возведенных насыпей, отвалов и намытых площадей	

деформируемость и устойчивость при оттаивании

нические свойства

Механические

Прочность и упругость высокие. Сопротивление сжатию 50—400 МПа, скалыванию 20—100 МПа, разрыву 2—15 МПа. Несжимаемы, устойчивы в откосах. Модуль общей деформации обычно выше 10 000 МПа. Скорость распространения продольных волн v_p изменяется от 4,0—4,5 до 6,5—7,0 км/с, у некоторых разностей до 8,0 км/с, сейсмическая жесткость 10—12. Коэффициент сдвига бетона по этим породам достигает 0,65—0,70. Крепость высокая, $f_{кр} > 8$. Разрабатываются взрывным способом. Характерна анизотропия свойств пород в условиях естественного залегания

Прочные — с сопротивлением сжатию 15—50 МПа, средней прочности — 2,5—15 МПа и малой прочности $< 2,5$ МПа. Сопротивление скалыванию превышает 5 МПа у пород прочных, от 1 до 5 МПа — у пород средней прочности и менее 1 МПа — у пород слабых. Сопротивление разрыву — от 0,1—0,2 до 2—3 МПа. Слабосжимаемы или практически несжимаемы. Модуль общей деформации у пород ослабленных < 2000 МПа, у пород менее ослабленных — от 2000 до 10 000 МПа. Скорость распространения продольных волн v_p от 1,1—1,6 до 4,0—4,5 км/с, сейсмическая жесткость от 2,9—4,7 до 10—12. Коэффициент сдвига бетона по этим породам изменяется от 0,3 до 0,5—0,55. Устойчивость в откосах зависит от степени трещиноватости и выветрелости. Крепость средняя, $f_{кр} = 2 \div 8$. Разрабатываются ударным инструментом и взрывным способом. Характерна анизотропия свойств пород в условиях естественного залегания. Многие разности обладают реологическими свойствами

Продолжение табл. I-1

Группа	Физико-механиче	
	Физические	Водные
III	Плотность (1,40—1,90 г/см ³) и пористость (25—40 %) изменяются в широких пределах	Невлагоемкие или слабовлагоемкие (тонко- и мелкозернистые разности), практически нерастворимые, водопроницаемые. Коэффициент фильтрации до 30 м/сут у слабо- и средневодопроницаемых и превышает 30 м/сут у сильноводопроницаемых
IV	Плотность (1,10—1,20, до 1,90—2,10 г/см ³), пористость [(20—30)—(75—80 %)] и влажность (12—15, до 75—80 %) изменяются в широких пределах	Влагоемкие, нерастворимые, слабо- и средневодопроницаемые или водоупорные. Коэффициент фильтрации обычно меньше 0,1 м/сут
V	Горные породы этой группы характеризуются специфическими оценки	

родны по составу, строению и физическому состоянию и более анизотропны по свойствам. Это обусловлено тем, что в этих условиях горные породы обычно имеют поверхности и зоны ослабления, значительно и неравномерно трещиноваты и выветрелы, в них более резко выражены текстурные признаки (слоистость, сланцеватость, полосчатость и др.), часто они нарушены тектоническими подвижками и имеют различное напряженное состояние в зависимости от положения в геологической структуре района.

Поэтому для инженерно-геологической характеристики и оценки горных пород, и особенно скальных и полускальных, решающее значение имеют данные полевых геологических наблюдений и исследований, данные о свойствах горных пород, полученные в результате выполнения полевых опытных работ. В основе такого изучения должны лежать структурно-петрографические и структурно-тектонические методы. Это значит, что прежде всего следует уделять внимание изучению состава и строения горных пород, закономерностей расположения отдельных минеральных компонентов, расположения и ориентировки поверхностей и зон ослабления, неоднородности и анизотропности породы в целом.

Механические

Прочность зависит от плотности сложения. Прочность небольшая, $f_{кр} < 2$. Обычно сжимаемы. Модуль общей деформации изменяется от 5—10 до 100 МПа. Скорость распространения продольных волн v_p от 0,2—1,0 до 1,5—1,8 км/с, сейсмическая жесткость от 0,5—2,9 до 4,0—4,8. Коэффициент внутреннего трения $f = 0,25 \div 0,60$. Устойчивость в основании сооружений и в откосах зависит от величины внутреннего трения и интенсивности динамических воздействий. Разрабатываются механическим и ручным способами

Прочность изменяется в широких пределах в зависимости от влажности и плотности. Прочность небольшая, $f_{кр} < 2$. Сжимаемы и сильносжимаемы, модуль общей деформации изменяется от 5 до 100 МПа. Скорость распространения продольных волн v_p от 0,3—0,85 до 1,0—2,2 км/с, сейсмическая жесткость от 0,8—2,3 до 2,8—5,9. Коэффициент внутреннего трения мал, $f = 0,15 \div 0,35$. Устойчивость в откосах зависит от влажности пород и высоты откоса. Разрабатываются ручным и механическим способами. Характерны реологические свойства

свойствами, требуют специальных методов исследований и индивидуальной

Изучение горных пород производится в первую очередь в процессе выполнения инженерно-геологической съемки, разведочных и опытных работ и стационарных наблюдений. Материалы этих исследований имеют решающее значение для инженерно-геологической оценки условий строительства на них различных сооружений и их устойчивости. В этом состоит первая существенная особенность инженерно-геологического изучения горных пород. При этом данные лабораторных исследований физико-механических свойств имеют неодинаковое значение для различных групп горных пород. Для скальных и полускальных пород они позволяют расширить характеристику их свойств, несколько уточнить некоторые полевые данные, но существенно изменить полевую оценку места расположения сооружений, условий их строительства и устойчивости не могут.

Из этого следует, что данные лабораторных исследований физико-механических свойств скальных и в известной мере полускальных горных пород имеют важное, но подчиненное значение. В отличие от скальных пород, для многих петрографических типов полускальных горных пород (аргиллитов, мергелей, глинистых известняков, песчаников и др.), а также для связных глинистых, рыхлых несвязных песчаных и пород осо-

бого происхождения, состава и свойств данные лабораторных исследований физико-механических свойств имеют несравненно большее и нередко решающее значение. Все эти обстоятельства не всегда в полной мере учитываются при инженерно-геологических исследованиях, хотя это составляет также одну из важных особенностей изучения физико-механических свойств горных пород.

При изучении и оценке прочности, устойчивости, деформируемости и водопроницаемости горных пород важно учитывать их анизотропию, обусловленную поверхностями и зонами ослабления, уменьшением напряжений при разгрузке, сопровождающейся образованием зон разгрузки, трещин упругого отпора и т. д. Поэтому перечисленные свойства горных пород важно характеризовать не только средними показателями, но и дирекционными, определяемыми по характерным направлениям. Такие дирекционные показатели свойств пород часто могут использоваться в качестве расчетных. Для их установления следует применять не стандартные, а специальные методики инженерно-геологических исследований.

Например, разведочные выработки и опытные участки следует располагать не равномерно на строительных площадках, а по определенным направлениям в зависимости от ориентировки трещин, тектонических зон и других поверхностей и зон ослабления. Разведочные выработки должны быть не только вертикальными, но и наклонными и горизонтальными. Свойства пород следует изучать не только равномерно по всему разрезу толщи, но главным образом на определенных глубинах, в пределах определенных зон и т. д.

В общем весь план инженерно-геологических исследований, разведочных, опытных и других работ должен определяться в зависимости от распределения нагрузок от сооружений, а также в зависимости от расположения и ориентировки поверхностей и зон ослабления в толще пород. Выполнение этих методических рекомендаций немыслимо без предварительного регионального изучения района, т. е. без предварительного выполнения инженерно-геологической съемки в масштабе, соответствующем стадии исследований и геологической изученности района. В этом состоит также одна из важнейших особенностей изучения физико-механических свойств горных пород.

Скальные породы по своим свойствам существенно отличаются от полускальных. Это отличие не только количественное, но и качественное. Они обладают высокой прочностью, упругостью и малыми абсолютными и относительными деформациями. Разрушаются они хрупко, мгновенно, с потерей сплошности. В обычных условиях упруговязкие и вязкопластические деформации, т. е. деформации, развивающиеся во времени, для них нехарактерны. Такие деформации у скальных пород воз-

можно только в особых условиях — на больших глубинах земной коры, и развиваются они в течение длительного геологического времени (периоды, эпохи и т. д.). Следовательно, в обычных условиях они могут характеризоваться только мгновенной прочностью.

Полускальные породы обладают меньшей прочностью и упругостью и несравненно большей и значительной деформируемостью. Они обычно имеют хрупкопластический или пластический характер разрушения. Для них в обычных атмосферных условиях характерно развитие деформаций во времени при постоянной нагрузке. Время развития деформаций ползучести соизмеримо со сроками испытаний пород в полевых и лабораторных условиях и сроками строительства и эксплуатации сооружений. Для таких пород важно учитывать не только мгновенную, но и длительную прочность. Все это показывает, что для полускальных пород характерны реологические свойства, которые необходимо учитывать.

Учитывая, что скальные и полускальные горные породы принципиально различаются между собой, их совершенно неправильно объединять в одну группу скальных или твердых. Такая ошибка допущена в ГОСТ, Строительных нормах и правилах, во многих учебниках и учебных пособиях и научных работах различных авторов.

Для понимания природы свойств крупнообломочных, песчаных и особенно глинистых пород важно учитывать не только их геолого-петрографические особенности, но и свойства, обусловленные дисперсностью, так как эти породы можно рассматривать как определенные многофазные системы, состоящие из минеральных частиц, воды и воздуха или газов. Системы, состоящие из двух или более фаз, из которых одна или несколько распределены в другой, называются дисперсными. В зависимости от степени раздробленности твердой фазы (степени дисперсности) они подразделяются на грубые дисперсии (> 2 мкм), тонкие дисперсии (от 2 до 0,1 мкм), коллоиды (от 0,1 до 1 нм) и молекулярные системы (< 1 нм). С изменением степени дисперсности изменяются и свойства дисперсных систем.

Если сравнивать свойства различных дисперсных систем, можно заметить, что грубые дисперсии значительно отличаются от тонких дисперсий и коллоидов. Тонкие дисперсии и коллоиды обладают многими общими свойствами, поэтому их можно рассматривать вместе как тонкодисперсную часть пород. Эта часть обломочных и глинистых пород имеет особый минеральный состав, предопределяющий ее высокую дисперсность и значительную удельную поверхность. В соответствии с этим она обладает большой поверхностной энергией на границе раздела твердой и жидкой фаз и большой физико-химической активностью при взаимодействии с водой.

Повышенное содержание тонкодисперсных частиц в породах определяет в значительной степени их «глинистые» свойства и принципиальные отличия по свойствам глинистых пород от песчаных и других обломочных. Эти отличия особенно проявляются в поглотительной способности пород, т. е. в способности поглощения ими различных твердых, жидких и газообразных веществ, ионов, молекул и коллоидных частиц из окружающей среды. Поэтому при изучении физико-механических свойств рыхлых несвязных песчаных и других обломочных и мягких связных глинистых пород первостепенное значение имеет определение степени их дисперсности и минерального состава тонкодисперсной части, а для глинистых пород также и показателей коллоидно-химических свойств (емкости поглощения, состава обменных ионов, коллоидной активности и др.). В этом состоит одна из важных особенностей изучения их физико-механических свойств.

Чем меньше объем или образец породы, тем меньше дефектов он может иметь. Поэтому, например, прочность горных пород по данным испытаний образцов малых размеров часто выше, чем образцов больших размеров. Следовательно, в этом случае имеет значение масштабный фактор. Учитывать его необходимо при изучении свойств любых горных пород, но при изучении скальных и полускальных пород он проявляется сильнее, так как эти породы обычно более гетерогенны по расположению различных дефектов, зон и поверхностей ослабления. В этом заключается также одна из особенностей изучения свойств горных пород. Однако не всегда с уменьшением объема пород обследуемого интервала выработки или размера образца пород повышается их качество по данным испытаний. Может быть и наоборот, например, если малый образец вырезан полностью из ослабленной или разрушенной зоны пород или если небольшой интервал скважины, выделенный для испытаний, оказывается в зоне наиболее влажных или трещиноватых пород и т. д. В таких случаях оценка качества пород по данным испытаний окажется заниженной.

При изучении физико-механических свойств горных пород важно также характеризовать их сложение, т. е. естественное пространственное расположение компонентов, слагающих породу, степень нарушенности естественной текстуры и изменения естественной влажности. Сложение может быть естественным или нарушенным. При естественном сложении в породе сохраняется естественное взаимное расположение слагающих ее компонентов — ее текстура, возникающая в процессе формирования породы. С понятием естественного сложения породы обычно неразрывно связано понятие о ее естественном физическом состоянии. При нарушении сложения в породе нарушается естественное взаимное расположение слагающих ее компонентов —

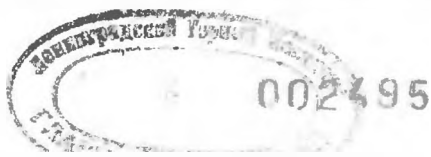
ее текстура и соответственно изменяется физическое состояние. Порода может быть раздавлена, размята или разбита на глыбы, куски, обломки, беспорядочно перемешанные между собой и с рыхлой песчано-глинистой массой из той же породы. Такие изменения сложения породы могут быть вызваны механическими факторами (проходкой горных выработок, бурением скважин, оползновыми процессами и т. д.), физическими (промерзанием и оттаиванием, высушиванием, интенсивным увлажнением и т. д.) или химическими (химическим выветриванием, интенсивным выщелачиванием и т. д.).

Если порода будет служить естественным основанием для какого-либо сооружения или средой для него, ее свойства должны изучаться при естественном сложении и влажности (на монолитах). Если она будет использоваться как строительный материал для отсыпки насыпей, дамб, земляных плотин, ее свойства следует изучать на образцах нарушенного сложения, но при влажности, возможно более близкой к естественной или заданной, так как при высушивании некоторые свойства породы необратимо изменяются.

Свойства горных пород не всегда представляется возможным выражать определенными количественными характеристиками. Поэтому для характеристики состава, состояния и свойств широко применяют описательные приемы, сравнительные показатели и различные косвенные методы. Наконец, иногда производят крупномасштабные опыты, например сдвиги крупных блоков пород, выполняя их в производственных условиях (в строительных котлованах, горных выработках), а также применяют различные приемы моделирования и стационарные наблюдения.

При решении различных инженерно-геологических задач, связанных с проектированием и строительством сооружений, разработкой месторождений полезных ископаемых, а также с мелиоративными работами по улучшению территорий, помимо общих сведений о горных породах (об условиях и формах их залегания, напряженном состоянии, общем строении пород, отражающем их неоднородность и анизотропность, расположении и ориентировке поверхностей и зон ослабления, зон разгрузки, выветрелости и трещиноватости), представляют интерес следующие характеристики:

- 1) вещественный состав (минеральный, гранулометрический, химический);
- 2) особенности строения (структура, текстура и сложение);
- 3) физические свойства (плотность минеральной части пород и плотность пород, пористость, влажность, консистенция для глинистых пород, относительная плотность для песчаных пород);



4) водные свойства (водоустойчивость, влагоемкость и водоемкость, капиллярность и водопроницаемость);

5) механические свойства (прочность на сжатие и разрыв, сопротивление скалыванию и сдвигу, общая деформируемость, сжимаемость и просадочность, ползучесть и длительная прочность);

6) показатели специального назначения (крепость, твердость, истираемость, износ, абразивность, сопротивление резанию, разрыхляемость, морозоустойчивость).

При изучении всех этих свойств горных пород применяют разнообразные полевые и лабораторные методы и методики исследований, приборы и установки. В настоящем руководстве приводится описание только лабораторных методов.

Изучение физико-механических свойств горных пород только тогда полноценно, когда оно комплексно, т. е. когда сопровождается полным изучением их петрографических особенностей. Данные о свойствах пород без петрографических сведений имеют несравненно меньшее значение, они неполноценны и мало надежны. Важно обратить внимание на то, что ответственные заключения и оценка свойств горных пород не могут базироваться на единичных определениях. Для этого требуется минимально необходимое число определений, обеспечивающее получение обоснованных средних — обобщенных и дирекционных характеристик свойств пород, а также характеристик, показывающих степень их неоднородности и изменчивости. Такие характеристики должны обеспечивать надежность инженерных расчетов и решений. Число определений должно быть таким, чтобы можно было применить методы математической статистики для обработки результатов исследований.

§ 4. ОТБОР ПРОБ ПОРОД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИХ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Работы по лабораторному изучению физико-механических свойств горных пород распадаются на две самостоятельные части. Первая сводится к отбору необходимого количества проб пород из естественных обнажений, горных выработок и буровых скважин в процессе полевых работ; вторая состоит в выполнении собственно лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород по отобранным пробам.

Отбор проб или, как принято говорить, опробование горных пород производят в процессе инженерно-геологической съемки, разведочных и опытных работ на каждой стадии инженерных изысканий. Детальность опробования повышается с повышением детальности инженерных изысканий на каждой последующей стадии. Описание методики и техники опробования и применяемого при этом оборудования приводится в соответствующем

щем разделе курса инженерной геологии при описании всех видов полевых работ, и в том числе полевых опытных работ, выполняемых с целью изучения физико-механических свойств горных пород полевыми методами [Ломтадзе В. Д. Специальная инженерная геология, 1978]. Здесь же важно обратить внимание на то, что достоверность и надежность данных лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород в известной степени зависит и от способа отбора проб, их упаковки, транспортировки и хранения.

Как было отмечено выше, в зависимости от решаемых практических задач пробы горных пород можно отбирать или в виде монолитов, т. е. образцов естественного сложения и влажности (мерзлых в мерзлом состоянии), или в виде образцов нарушенного сложения определенного объема или массы. Для определения полного комплекса физико-механических свойств горных пород проба должна состоять из двух-трех монолитов. Рекомендуются следующие размеры монолитов различных типов горных пород: из скальных и полускальных от $25 \times 25 \times 25$ до $30 \times 30 \times 30$ см, из галечниковых и щебенистых от $25 \times 25 \times 25$ до $30 \times 30 \times 30$ см, из гравелистых и дресвяных от $20 \times 20 \times 20$ до $25 \times 25 \times 25$ см, из песчаных и глинистых от $15 \times 15 \times 15$ до $20 \times 20 \times 20$ см.

Монолиты могут иметь форму куба, параллелепипеда, кусков керна (диаметром не менее 80 мм, общей длиной 1,2—1,5 м) или штаффов неправильной формы, но не менее указанных выше размеров. В открытых выработках (шурфах, расчистках, котлованах и др.) их отбирают с зачищенных забоев или стенок, в буровых скважинах — с зачищенного забоя, сразу тщательно парафинируют и отмечают их ориентировку (верх и низ). Способ отбора монолитов из открытых выработок и скважин должен обеспечивать полную сохранность естественного сложения и влажности пород в монолитах. При их отборе, особенно из глинистых и песчаных пород, одновременно отбирают пробы для контрольного определения естественной влажности в полевой лаборатории.

Парафинирование монолитов рекомендуется выполнять в следующем порядке: монолит покрывают тонким слоем парафина путем быстрого погружения его разными сторонами в расплавленный парафин при температуре 57—60 °С и туго обматывают слоем марли, предварительно пропитанной парафином. Затем вновь покрывают слоем парафина и туго обвертывают вторым слоем марли, также предварительно пропитанной парафином, после чего снова покрывают слоем парафина. В таком виде монолит направляют в лабораторию.

Монолиты горных пород, не сохраняющие естественное сложение без жесткой тары, из открытых выработок отбирают методом режущего кольца, а из скважин — грунтоносами, снаб-

женными специальными гильзами. Диаметр таких монолитов должен быть не менее 80 мм, а общая их длина должна обеспечивать необходимый объем пробы. Монолиты, отобранные в жесткую тару, парафинируют в этой таре, причем открытые их торцы после парафинирования закрывают жесткими крышками с резиновыми прокладками.

Пробы горных пород нарушенного сложения отбирают в тару, обеспечивающую сохранность мелких частиц (мешочки из плотной ткани, полиэтиленовой пленки, плотной водостойкой бумаги и др.). Объем таких проб из глинистых и песчаных пород должен быть в пределах от 600 до 1000 см³ (1—1,5 кг), из гравелистых и дресвяных от 1000 до 2000 см³ (1,5—3 кг), а из галечниковых и щебенистых от 2000 до 3000 см³ (3—4 кг).

Каждая проба пород естественного или нарушенного сложения должна сопровождаться этикеткой, содержащей следующие сведения: а) наименование организации, экспедиции или партии; б) номер пробы; в) место взятия пробы; г) глубина отбора пробы; д) наименование породы по полевому определению; е) подпись лица, отбравшего пробу; ж) дата отбора пробы.

Пробы для транспортировки упаковывают в прочные ящики, общая масса которых не должна превышать 30—40 кг. Пробы естественного сложения и влажности упаковывают во влажные опилки, мелкую стружку, солому или другой мягкий материал, предохраняющий их от разрушения и высыхания. Хранить такие пробы желательно в помещениях с относительной влажностью воздуха не ниже 70—80 % при температуре не ниже 1—2 °С и не выше 18—20 °С. Срок хранения запарафинированных проб скальных и полускальных пород, а также мало-влажных песчаных и глинистых пород не должен превышать

Таблица 1-2. Журнал для регистрации проб горных пород, поступивших в лабораторию

Лабораторный номер	Дата поступления пробы	Место взятия пробы	Номер выработки, скважины, обнажения	Глубина взятия пробы, м	Полевое наименование породы	Сложение породы	Род упаковки	Наименование лабораторных определений	Дата окончания лабораторных испытаний	Примечание	Расписка в получении результатов испытаний

1,5 мес, а остальных — 1 мес, считая со дня их отбора, за исключением проб илов и некоторых разностей торфов. Их исследования должны производиться в самые сжатые сроки, так как их свойства быстро и необратимо изменяются.

Отбор, упаковка, хранение и транспортировка проб горных пород для определения показателей их свойств при строительстве всех видов зданий и сооружений регламентируются ГОСТ 12071—84.

Все пробы горных пород, поступающие в лабораторию для определения физико-механических свойств, регистрируются в специальном журнале (табл. I-2), а окончательные результаты испытаний записывают в сводную таблицу (см. приложение 3).

§ 5. СХЕМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЛАБОРАТОРНОГО ИЗУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Исследованию физико-механических свойств любых горных пород должно предшествовать детальное макроскопическое их изучение и описание, сопровождающееся применением простейших приемов и методов, позволяющих уточнить их состав, строение (структурные и текстурные особенности), физическое состояние и свойства. После макроскопического изучения пород начинают собственно лабораторные исследования их физико-механических свойств с применением различных специальных методов.

В зависимости от решаемых задач и технических возможностей в программу исследований может входить изучение полного комплекса свойств (вещественного состава и строения, физических, водных и механических свойств) или исследования выполняются по сокращенной программе, когда изучаются, например, только вещественный состав, строение и физические свойства. В том и другом случае в первую очередь надо иметь полное представление о самой горной породе, т. е. о ее вещественном составе, строении и физическом состоянии, являющимися закономерным следствием истории и условий ее образования. Особенности формирования горной породы определяется в основном и природа ее свойств. Эти данные позволяют предвидеть и прогнозировать свойства горных пород, правильно определять методику их изучения и более надежно оценивать результаты.

Рациональная схема последовательности изучения физико-механических свойств скальных и полускальных пород может быть следующей (рис. I-1).

1. Пробу, доставленную в лабораторию, регистрируют в журнале (см. табл. I-2), освобождают от парафина и разде-

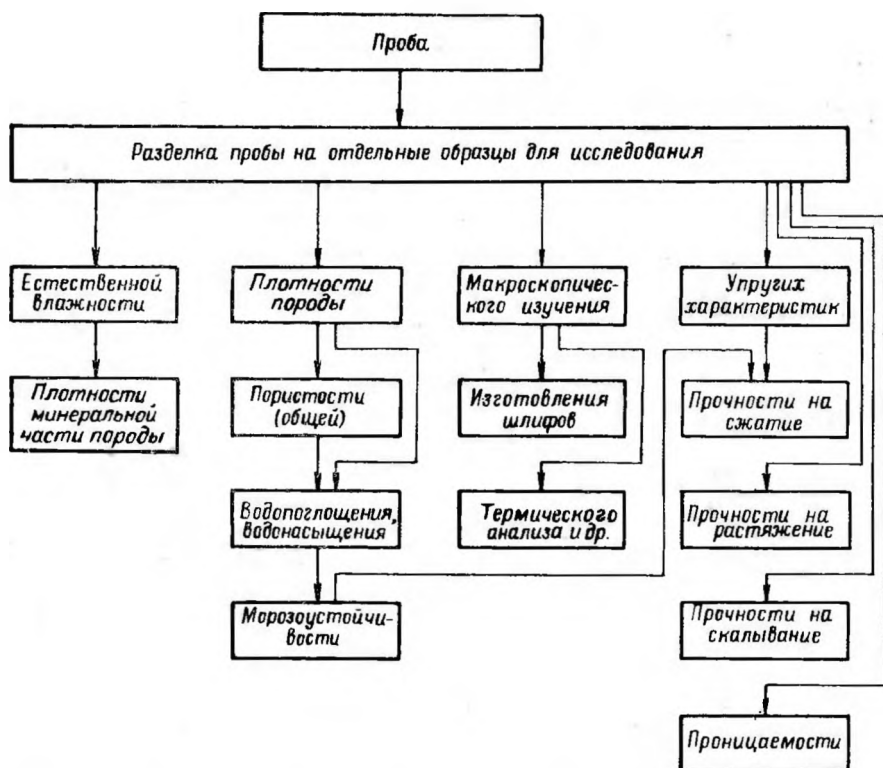


Рис. 1-1. Схема последовательности изучения вещественного состава, строения и физико-механических свойств скальных и полускальных горных пород.

ляют на отдельные образцы. Такие образцы, предназначенные для соответствующих испытаний, выпиливают, выбурируют, выкалывают или резе вырезают из пробы. Примерные указания о необходимом сложении, форме, массе или размере образцов породы и их числе для таких испытаний приведены в табл. 1-3.

2. В процессе разделки пробы в первую очередь из разных ее мест отбирают два-три куса породы для определения естественной влажности. Впоследствии эти образцы дробят и по ним определяют плотность минеральной части породы.

3. Одновременно по образцам кубической, цилиндрической или неправильной формы определяют плотность породы. Затем эти образцы используют для определения пористости (открытой) породы методом насыщения, а также ее водопоглощения, водонасыщения и морозоустойчивости.

4. Параллельно с определением влажности и плотности породы производят макроскопическое ее изучение и описание, от-

бирают кусочки для изготовления шлифов, на термический (карбонатные и глинистые породы) или другие специальные анализы для изучения вещественного состава и строения.

Остальные образцы той или иной формы используют для параллельного определения проницаемости, упругих характеристик (динамическими и статическими методами) и прочности пород на сжатие, растяжение и скалывание в воздушно-сухом и насыщенном водой состоянии. Упругие характеристики определяют динамическими методами на образцах, используемых для определения прочности породы на сжатие, растяжение и скалывание, а статическими методами — главным образом на образцах для определения прочности на сжатие. Все образцы, предназначенные для перечисленных испытаний, после их выпиливания или выбуривания из пробы хранят в эксикаторах.

5. На остатках пробы определяют истираемость, абразивность и другие специальные характеристики свойств пород.

Схема последовательности изучения физико-механических свойств песчаных и других рыхлых обломочных и глинистых пород (рис. 1-2) несколько отличается от схемы изучения скальных и полускальных пород.

1. Пробу регистрируют в лабораторном журнале (см. табл. 1-2), освобождают от парафина и из нее вырезают отдельные образцы для исследования различных свойств. Большинство образцов, особенно из монолитов глинистых пород, вырезают методом режущего кольца (см. гл. III, § 3) для испытания породы на сдвиг, компрессию, набухание, размокание и др.

2. В процессе разделки пробы без промедления на отдельных образцах определяют плотность и естественную влажность породы. Впоследствии из этих же образцов берут навеску для определения плотности минеральной части породы. Монолиты песчаных и других рыхлых пород, не сохраняющие естественное сложение без жесткой тары, аккуратно очищают от парафина, взвешивают в этой таре для определения их плотности.

3. Параллельно с определением влажности и плотности породы производят макроскопическое ее изучение и описание, отбирают кусочки глинистой породы для изготовления шлифов, на термический анализ, для определения емкости поглощения, состава обменных ионов, содержания органики и солей. Одновременно берут навеску (из глинистых пород естественной влажности) для определения гранулометрического состава породы. В процессе выполнения гранулометрических анализов собирают отдельные фракции для изучения минерального и петрографического (грубозернистой фракции) состава породы. При этом для мелких и тонких фракций желательное применение комплекса методов (иммерсионный, термический, рентгеновский, электронно-микроскопический и др.).

Таблица I-3. Сложение, форма, масса или размеры образцов горных пород для исследования их состава, строения и физико-механических свойств

Показатели	Породы	Сложение и влажность породы в образце	Форма образца	Масса или размеры образца	Число образцов
Состав и строение					
Минеральный состав	Скальные, полускальные и связные глинистые	Естественные	Любая	200—300 г	2—3
	Глинистые (тонкодисперсная часть)	Любые	»	100—200 г	1—2
Содержание водорастворимых солей	Пески и другие обломочные	Нарушенное	»	100—200 г	1—2
Содержание органического вещества	Глинистые и некоторые полускальные	Любые	»	100—200 г	1—2
Емкость поглощения и состав обменных ионов	Преимущественно глинистые	»	»	100—200 г	1—2
Гранулометрический состав	То же	»	»	100—200 г	1—2
	Гравелистые и другие более грубозернистые	Нарушенное	»	600—3000 см ³	1
	Пески	»	»	200—600 см ³	1
	Глинистые	Естественные	»	50—200 см ³	1
Физические свойства					
Влажность и естественная влажность	Все породы	Влажность естественная, сложение любое	»	20—50 г	1
Плотность	»	Естественные	Неправильная, кубик, цилиндр	До 1000 см ³	1
	Пески (рыхлые и плотные) и другие рыхлые обломочные породы	Нарушенное, сухие, воздушно-сухие	Любая	200—3000 см ³	1
Плотность минеральной части	Все породы	Нарушенное	»	20—50 г	1
Пористость		Определяется расчетом			

Пористость открытая*	Пески и некоторые другие породы	Сложение любое в зависимости от задач	Любая или кубик, цилиндр	До 500 г или 5×5×5 см	1—3
Пределы пластичности	Глинистые (главным образом четвертичного возраста)	Сложение любое, влажность естественная	Любая	300—500 г	1
Липкость	То же	То же	»	200—300 г	1
Водные свойства					
Размокание	»	Естественные	Кубик, цилиндр	5×5×5 см	1—3
Набухание	»	»	»	Диаметр 50—70 мм, высота 15—20 мм	1—3
Усадка	»	Естественное или нарушенное в зависимости от задач	»	5×5×5 см	1—3
Полная влагоемкость	»		Определяется расчетом		
Полная водоемкость**	Пески и другие рыхлые обломочные породы	Нарушенное	Любая	200—300 см³	1
Водопоглощение и водонасыщение	Скальные и полускальные	Естественное	Кубик, цилиндр	5×5×3 см	3—5
Максимальная молекулярная влагоемкость***	Глинистые породы и пески (мелко- и тонкозернистые)	Нарушенное	Любая	300 г	1—3
Максимальная молекулярная водоемкость	Пески и другие грубозернистые породы	»	»	500—1000 г	1
Водоотдача	Пески и другие грубообломочные породы	Определяется расчетом			
Капиллярное поднятие	Пески и отчасти глинистые породы	Нарушенное, но может быть и естественное	Любая или цилиндр	До 1000 г	1
Водопроницаемость	Песчаные	Нарушенное или естественное	Любая	500—2000 см³	3—5
	Глинистые	Естественное	Цилиндр	Диаметр 50—70 мм, высота 15—20 мм	3—5

* Определяется методом насыщения.

** Определяется методом пипетки.

*** Определяется методом высоких колонн.

Показатели	Породы	Сложение и влажность породы в образце	Форма образца	Масса или размеры образцов	Число образцов
Проницаемость	Скальные, полускальные, глинистые	Естественное	Цилиндр	Диаметр 35—50 мм, высота 15—50 мм	3—5
Механические свойства					
Прочность на сжатие	Скальные, полускальные, глинистые	»	Кубик, цилиндр	5×5×5—10×10×10 см	3—5
Прочность на скалывание	Скальные, полускальные	»	Кубик, цилиндр, призма	Диаметр и высота 50—70 мм	3—5
Прочность на растяжение	Скальные, полускальные, глинистые	»	Цилиндр, призма	Диаметр 50—70 мм, длина 100—200 мм	3—5
Упругие характеристики	Скальные, полускальные	»	Кубик, цилиндр, призма	5×5×5—10×10×10 см	1—3
Компрессионные свойства	Глинистые, песчаные	Естественное или нарушенное в зависимости от задач	Цилиндр	Диаметр 50—70 мм, высота 15—20 мм	1—3
Сопротивление сдвигу****	Глинистые, песчаные	То же	»	Диаметр 50—70 мм, высота 15—20 мм	3—5
Угол естественного откоса	Пески и другие грубообломочные породы	Нарушенное	Любая	1000—3000 см ³	
Сопротивление пенетрации	Глинистые, песчаные	Естественное или нарушенное	Цилиндр, кубик	Диаметр 50—70 мм, высота 40—50 мм	3—5

**** При испытаниях в стабилометрах.

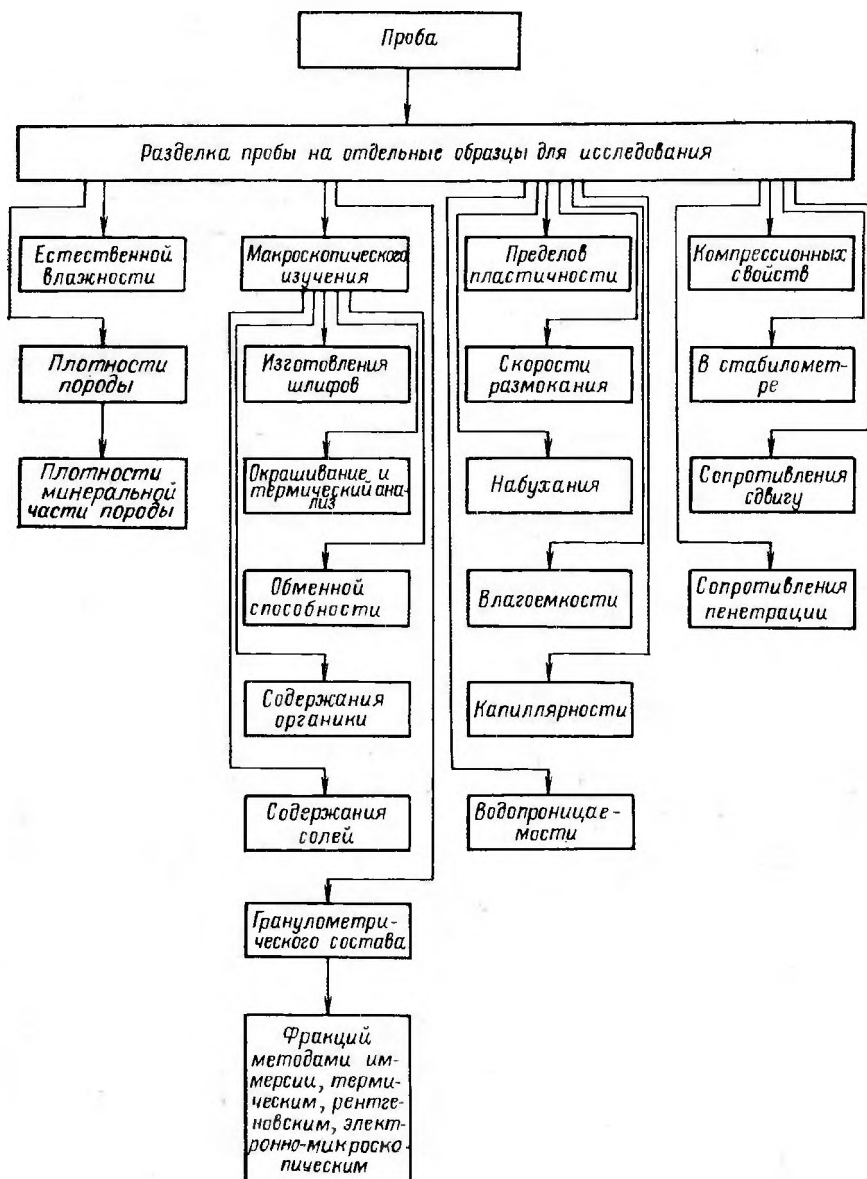


Рис. 1-2. Схема последовательности изучения вещественного состава, строения и физико-механических свойств песчаных и глинистых пород.

4. Отдельные кусочки влажной глинистой породы или остатки вырезанных образцов собирают в чашку и ставят в эксикатор с водой для последующего определения пределов пластичности. При этом если порода маловлажная, ее следует увлажнить, если очень влажная, этого делать не следует. Остатки монолитов после вырезывания необходимого числа образцов вновь парафинируют.

5. Продолжают исследование вещественного состава и строения породы, ее физических, водных и механических свойств. Целесообразно в первую очередь проводить испытание породы на компрессию, исследовать скорость и характер размокания и набухания. Определив нагрузку начала сжатия породы в процессе компрессионных испытаний, т. е. ее структурную прочность, устанавливают схему исследования на сдвиг и приступают к ее выполнению.

Таким образом, сначала выполняют те исследования, для которых необходимы образцы естественной влажности и сложения и которые занимают длительное время. Параллельно с ними можно производить и некоторые другие определения.

§ 6. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Для того чтобы обеспечить правильность, надежность и соответствующую точность результатов лабораторных исследований состава, строения и физико-механических свойств горных пород, необходимо соблюдать определенные общие правила.

1. Знать соответствующий теоретический материал и ясно представлять, для каких целей исследуется то или иное свойство горных пород.

2. Знать и уметь выполнять методику испытаний или исследований горных пород. При этом следует учитывать, что существуют следующие методики: а) стандартные, регламентируемые ГОСТ; б) специальные, которые применяют при исследовании специфических свойств горных пород или в связи с решением специальных задач проектирования и строительства сооружений; в) упрощенные, полевые, позволяющие исследовать горные породы упрощенными приемами и способами для получения массовых предварительных данных об их свойствах. Противопоставлять методики не следует, необходимо уметь брать ту или иную либо их сочетание.

3. Соблюдать определенный режим испытаний горных пород, т. е. исследовать их при определенных влажности и плотности, скорости приложения нагрузки или продолжительности ее действия.

4. Знать устройство приборов и установок, их назначение и приемы работы с ними.

5. Ясно представлять, что на результаты исследований очень большое влияние оказывают несоблюдение требований, предъявляемых к массе, размеру и форме образцов, неточность их вырезывания или подгонки к рабочей части прибора. Недопустимо использовать образцы с различными дефектами. Наконец, необходимо строго соблюдать правила установки или загрузки образца породы в прибор и установки самого прибора.

6. Тщательно и аккуратно производить необходимые наблюдения, измерения, зарисовки и записи; ясно представлять, с какой точностью должны выполняться наблюдения, измерения и подсчеты при определении тех или иных показателей свойств горных пород.

7. Строго соблюдать правила техники безопасности при установке, загрузке и разгрузке приборов, включении и выключении машин, электрооборудования, нагревательных приборов и т. д.

8. Уметь анализировать и критически оценивать полученные результаты определений и исследований, знать причины возможных ошибок и уметь их устранять. При этом важно учитывать, что погрешности при лабораторных исследованиях могут быть случайными, систематическими и грубыми. Случайные погрешности непостоянны по величине и знаку, они неустраняемы из опыта, но могут быть выявлены и оценены количественно-статистическими методами. Эти погрешности определяют точность эксперимента, точность метода и зависят главным образом от неоднородности горных пород, способа отбора проб, изменения условий испытаний и т. д. Для их выявления производят повторные наблюдения, измерения, повторяют или параллельно выполняют определения. В связи с появлением случайных погрешностей и неоднородностью состава и свойств горных пород нельзя по данным исследований одного образца судить об их свойствах.

Систематические погрешности обычно бывают постоянной величины и знака. Они возникают из-за неточности подгонки отдельных деталей приборов, деформации самих приборов при их загрузке, неточности градуировки шкалы прибора, неточной установки прибора на нуль и др. Такие погрешности должны устраняться путем тарировки приборов и установок, их поверки и т. д. Для этого в результаты измерений и определений вводят соответствующие поправки согласно указаниям, приводимым в паспортах приборов и установок.

Грубые ошибки, когда отдельные определения явно отличаются от всей массы наблюдений, измерений и определений, возникают в результате неверной записи показаний, неисправности прибора, неаккуратной загрузки образца или других при-

чин. Определения, содержащие грубые ошибки, обычно исключают, не учитывают при обработке и анализе данных исследований.

Таковы основные общие правила выполнения лабораторных исследований горных пород. Конкретные указания об их применении даны при описании методики определений тех или иных свойств.

Контрольные вопросы

1. Какие свойства следует называть физико-механическими?
2. Перечислите показатели физико-механических свойств горных пород.
3. Что характеризует показатели физических свойств горных пород?
4. Основные показатели водных свойств горных пород и их использование в инженерной практике.
5. Показатели механических свойств горных пород.
6. Роль данных лабораторного изучения для оценки физико-механических свойств различных групп горных пород.
7. Группы горных пород, выделенные в инженерно-геологической классификации, и их характеристика.
8. Каковы особенности изучения физико-механических свойств горных пород?
9. Требования, предъявляемые к отбору проб горных пород для изучения их физико-механических свойств.
10. Способы упаковки проб горных пород, предназначенных для исследования физико-механических свойств. Необходимые условия хранения проб.
11. Схема последовательности изучения физико-механических свойств скальных и полускальных горных пород.
12. Схема последовательности изучения физико-механических свойств песчаных и глинистых горных пород.
13. Перечислите основные общие правила выполнения лабораторных исследований горных пород.
14. Причины возможных погрешностей в лабораторных определениях свойств горных пород. Как их можно устранить или учесть?

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При инженерно-геологическом изучении горных пород в первую очередь исследуют их физико-механические свойства, природу этих свойств и факторы, влияющие на их изменение. В соответствии с этим изучение вещественного состава и строения горных пород хотя и производится петрографическими методами и приемами, но всегда имеет специализированный характер, так как при этом главное внимание обращается на то, что влияет на их физическое состояние, прочность, деформируемость, устойчивость и водонепроницаемость.

Поэтому в настоящей главе не приводится полного описания всех известных методов изучения вещественного состава и строения горных пород (это достаточно полно освещено в соответствующих руководствах по петрографии), а обращается главное внимание на применение этих методов для решения инженерно-геологических задач и дается описание методов изучения тех особенностей состава и строения горных пород, которые имеют важное значение для характеристики и оценки их физико-механических свойств.

§ 2. МАКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ И ОПИСАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Макроскопическое изучение и описание горных пород в лабораторных условиях расширяет результаты полевых наблюдений и уточняет их по отношению к определенной пробе пород. В дальнейшем эти породы изучают более детально специальными методами.

При макроскопическом изучении пород дается описание всех основных их признаков: названия, цвета и оттенков, строения (структуры и текстуры), т. е. размера минеральных зерен и обломков, составляющих породу, их формы и однородности размера, а для магматических и метаморфических пород указываются степень их раскристаллизованности, наличие или отсутствие ориентированного расположения зерен и обломков, слоистости, полосчатости, сланцеватости, макропористости и других особенностей текстуры.

Затем приводится характеристика основных породообразующих минералов и петрографического состава обломков, а для осадочных пород — состава цемента и характера цементации.

Особо отмечается наличие различных примесей, включений и вторичных изменений состава и строения породы. Завершается макроскопическое описание характеристикой физического состояния породы: влажности, плотности, консистенции, прочности, выветрелости и др.

При макроскопическом описании используют лупу и 10 %-ную соляную кислоту, наблюдают поведение породы при смачивании водой, растирании и перемятии, при разрушении молотком, ножом, при пистолетном. При этом используют классификационные таблицы и эталоны. Описание может сопровождаться зарисовками и фотографированием деталей состава и строения горных пород.

§ 3. МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД В ШЛИФАХ

Изучение магматических, метаморфических, осадочных сцементированных и глинистых горных пород под микроскопом в шлифах является естественным продолжением их макроскопического изучения. Оно позволяет получить представление о составе и строении породы в целом, т. е. о ее минеральном составе, структуре и микротекстуре, о наличии характерных примесей и включений, об органических остатках, вторичных изменениях, о составе цемента и характере цементации породы, ее пористости и других особенностях состава и строения. Поэтому лабораторное изучение перечисленных групп горных пород всегда следует начинать с микроскопического исследования в шлифах.

Естественно, что микроскопическое изучение дает не для всех горных пород одинаково полную информацию, что и обуславливает необходимость применения для изучения состава и строения некоторых петрографических типов пород еще и других специальных методов. Так, например, при изучении вещественного состава глинистых пород кроме перечисленных применяют методы гранулометрического, термического и рентгеновского анализов, окрашивания органическими красителями и исследования под электронным микроскопом. Для карбонатных пород также кроме исследования в шлифах выполняют термический анализ и исследование составляющих породу минералов иммерсионным методом.

При исследовании вещественного состава и строения рыхлых несвязных пород (песков и др.) шлифы обычно не изготавливают, а после макроскопического изучения сразу переходят к анализу их гранулометрического состава, после чего изучают минеральный состав частиц, составляющих отдельные фракции пород, под лупой, биноклем или под микроскопом иммерсионным методом.

При изучении пород под микроскопом в шлифах особое вни-

мание уделяют их строению, особенно пород мелко- и тонкозернистых и скрытокристаллических. При этом определяют абсолютный и относительный размер зерен и обломков, относительное количественное содержание их в породе, степень кристалличности магматических и метаморфических пород или сцементированности и характер цементации осадочных пород. Отмечают наличие или отсутствие ориентировки минеральных зерен, обломков, пор, дают характеристику степени упорядоченности расположения отдельных элементов. Большое внимание уделяют изучению межгранулярной и трещинной пористости пород, форме и размеру пор, характеру их соединения между собой, составу материала, выполняющего поры.

Для количественной оценки микротекстуры глинистых пород полезно определять коэффициент ориентированности частиц C и коэффициент относительной упорядоченности текстуры U в породе [Муравьев В. И., 1962 г.; Шibaкова В. С., 1965, 1967 г.]. Получение указанных коэффициентов основано на свойстве двупреломления света глинистым веществом. Отдельные глинистые частицы не могут непосредственно наблюдаться под обычным поляризационным микроскопом. Однако если глинистые частицы в породе в целом или в отдельных ее участках имеют одинаковую ориентировку, то они будут иметь и одинаковое двупреломление по эффекту одновременного угасания или просветления при наблюдении в скрещенных николях.

Этот эффект выступает тем отчетливее, чем более однородно ориентированы частицы в породе в целом или в пределах отдельных ее участков, т. е. чем отчетливее выражены микротекстурные особенности породы — слоистость, полосчатость и др. Степень ориентированности частиц в любом участке породы оценивается с помощью коэффициента ориентированности частиц, предложенного в 1962 г. В. И. Муравьевым:

$$C = (1 - I_{\min}/I_{\max}) \cdot 100,$$

где $I_{\min}$ — световой поток при погасании поля зрения, измеряемый с помощью фотоэлектрической насадки к микроскопу ФЭМ-1; $I_{\max}$ — световой поток при просветлении поля зрения, измеряемый тем же способом.

Чем выше степень ориентированности частиц на отдельных участках, тем больше коэффициент C приближается к 100 %; при отсутствии ориентировки частиц коэффициент C близок к нулю. Так как ориентировка частиц на отдельных участках может быть неодинакова, необходимо определять и коэффициент относительной упорядоченности текстуры, предложенный в 1965 г. В. С. Шibaковой:

$$U = (S_1/S) \cdot 100,$$

где S_1 — площадь шлифа с одинаково ориентированными частицами; S — общая площадь шлифа.

Если коэффициент U равен 100 %, порода имеет полную упорядоченность микротекстуры, т. е. полную однородность ориентировки частиц в пределах всего поля зрения в шлифе. При $U=0$ порода состоит из массы, ориентация частиц на отдельных участках которой различна, следовательно, микротекстура в породе неупорядоченная.

При микроскопическом изучении горных пород в шлифах особое внимание уделяют точной диагностике породообразующих минералов и петрографического состава обломков, установлению степени свежести их, наличию вторичных минералов и проявлению процессов, ведущих к ослаблению связей между минералами и обломками и понижению механической прочности породы (серицитизация, каолинизация, хлоритизация и др.). В глинистых породах особое внимание уделяют установлению присутствия органики, ее количества и степени разложенности.

Результаты микроскопического изучения состава и строения пород изображают в виде описаний, зарисовок, микрофотографий и таблиц. По результатам исследований составляют заключение о петрографических особенностях каждого типа пород, определяющих их прочность, устойчивость, деформируемость и другие свойства.

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

При исследованиях рыхлых несвязных песчаных и мягких связных глинистых пород, главным образом четвертичного возраста, после их макроскопического изучения и описания и микроскопического исследования глинистых пород в шлифах (пески обычно в шлифах не изучают) производят анализ их гранулометрического состава, который существенно влияет на физико-механические свойства пород. Состав и строение песчаных и глинистых сцементированных коренных пород, как правило, должны изучаться микроскопическими методами в шлифах. Недопустимо также применение гранулометрического анализа при изучении грубообломочных образований элювиальной зоны коренных пород.

Гранулометрический, или механический, состав характеризует осадочные породы в отношении их дисперсности — размеров слагающих частиц, т. е. дает количественную характеристику структуры пород. Он выражает процентное содержание в породе групп частиц — фракций различных размеров, взятых по отношению к массе абсолютно-сухой породы. Размер фракций, слагающих ту или иную породу, выражают обычно в миллиметрах. Учитывая определенное содержание тех или иных

фракций в составе обломочных или глинистых пород, их классифицируют по гранулометрическому составу [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.].

Для определения гранулометрического состава пород производят гранулометрический анализ. Наиболее часто применяемые методы могут быть разделены на прямые и косвенные (табл. II-1). Прямые методы позволяют непосредственно выделять необходимые фракции, взвешивать и определять их процентное содержание в породе, а также использовать выделенные фракции, например, для изучения минерального состава. Косвенные методы не предусматривают разделения породы на фракции. Они основаны на изучении некоторых свойств исследуемой породы, по изменению которых можно судить о содержании в породе тех или иных фракций.

Для песчано-гравелистых пород в настоящее время основным методом считается ситовой. Этот метод позволяет определять содержание в породе фракций диаметром более 0,1 мм. Ситовой метод не требует применения сложной аппаратуры, прост при использовании и дает достаточно точные результаты.

Выделение фракций при анализе глинистых, тонко- и мелкозернистых песчаных пород производят обычно отмучиванием — по скорости падения частиц в воде, для определения которой теперь пользуются главным образом формулой Стокса:

$$v = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_m - \rho_v}{\eta},$$

где v — скорость падения частиц в воде, см/с; g — скорость свободного падения (ускорение силы тяжести), см/с²; r — радиус частиц, мм; ρ_m — плотность частиц, г/см³; ρ_v — плотность воды, г/см³; η — вязкость воды, П.

Из методов гранулометрического анализа, основанных на отмучивании породы в воде, наиболее распространены методы двойного отмучивания Сабанина и пипеточный. Выполнение анализа по этим методам требует более продолжительного вре-

Т а б л и ц а II-1. Методы гранулометрического анализа пород

Методы	Название метода	Способ определения содержания фракций
Прямые	Ситовой Сабанина, пипеточный и др.	Рассеивание на ситах Отмучивание в воде
Косвенные	Визуальный Ареометрический	Визуальное исследование пород Измерение плотности суспензии

мени, многочисленных операций по взвешиванию и высушиванию и сравнительно сложной аппаратуры. Метод Сабанина может быть рекомендован для анализов мелкопесчаных пород, имеющих небольшое содержание (не более 10 %) частиц диаметром менее 0,01 мм. Кроме того, он может применяться в комбинации с ситовым методом для определения содержания фракций диаметром более 0,1 мм и в комбинации с пипеточным для определения содержания фракций диаметром менее 0,01 мм.

При использовании метода Сабанина всегда получаются значительные погрешности в определении процентного содержания частиц диаметром менее 0,01 мм. При отмучивании вместе с частицами диаметром менее 0,01 мм обычно осаждаются и более крупные, и в результатах анализа получается завышенное содержание этих фракций. Поэтому метод Сабанина рекомендуется применять при ограниченном содержании в мелкопесчаной породе фракций менее 0,01 мм. Этим методом в настоящее время пользуются главным образом тогда, когда необходимо выделить и собрать отдельно песчаные и пылеватые фракции.

Пипеточный метод может быть рекомендован для анализа мелкопесчаных и главным образом глинистых пород. Этим методом обычно пользуются для определения содержания в породе фракций диаметром менее 0,1 мм. При наличии в породе более крупных фракций он может применяться в комбинации с ситовым. Пипеточный метод, несмотря на некоторые неточности, дает результаты наиболее правильные (по сравнению с другими), лучше согласующиеся со свойствами породы. Поэтому данный метод в настоящее время может быть рекомендован даже как контрольный. Кроме того, он удобен еще и тем, что позволяет одновременно выполнять 20—30 анализов.

Косвенный метод — визуальный — является полевым, он дает грубое, приближенное представление о гранулометрическом составе породы. Учитывая, что анализ этим методом занимает непродолжительное время и почти не требует оборудования, он может быть рекомендован для массовых исследований и приближенного суждения о составе как песчаных, так и глинистых пород.

Ареометрический метод гранулометрического анализа основан на измерении плотности суспензии, приготовленной из породы. Плотность суспензии изменяется по мере выпадения из нее более крупных частиц. Этот метод обладает сравнительно высокой точностью, приближающей его в этом отношении к пипеточному. При ареометрическом методе анализа породы не нужно производить многочисленных операций по выпариванию, высушиванию и взвешиванию фракций, что значительно облегчает и ускоряет выполнение анализов. Поэтому этот метод

можно рекомендовать для массовых анализов глинистых и мелкопесчаных пород. Ареометрический метод позволяет производить определение содержания частиц диаметром менее 0,1 мм. При наличии в породе более крупных фракций он должен применяться в комбинации с ситовым методом.

Подготовка пород к гранулометрическому анализу

Твердые частицы, слагающие песчаные и глинистые породы, могут быть образованы обломками минералов, обломками горных пород и агрегатами, возникающими в результате слипания мелких первичных частиц. Эти агрегаты различных размеров и прочности образуются на разных этапах формирования породы под влиянием процессов коагуляции, цементации, перекристаллизации и др. Агрегаты глинистых частиц могут возникнуть также в процессе анализа вследствие коагуляции частиц в суспензии, приготовленной для анализа, под влиянием электролитов, образующихся при растворении солей, содержащихся в породе.

В процессе гранулометрического анализа часть агрегатов (водонеустойчивые) в воде распадаются на составляющие их частицы или более мелкие агрегаты, а часть (водоустойчивые) сохраняются. Образование агрегатов, в том числе возникающих в процессе выполнения анализа, влияет на результаты гранулометрического анализа — уменьшает выход мелкодисперсных частиц и увеличивает выход крупнодисперсных. Это искажает правильное представление о породе, о содержании в ней тех или иных частиц и ее классификацию. Чтобы придать породе необходимую степень дисперсности, применяют следующие три способа подготовки породы к анализу.

1. Дисперсный способ, при котором породу приводят в состояние максимально возможного раздробления разрушением как неустойчивых, так и частично устойчивых агрегатов механической и химической обработкой. При этом способе породу тщательно растирают, обрабатывают соляной кислотой и промывают. В случае присутствия (более 2 %) органических веществ породу предварительно обрабатывают перекисью водорода.

2. Полудисперсный способ, при котором породу приводят в состояние естественно-элементарного расчленения разрушением водонеустойчивых агрегатов путем механической и физической обработки. При этом способе породу перед анализом замачивают, кипятят и растирают в присутствии стабилизаторов и пептизаторов суспензии (аммиак, едкий натр и др.). Обработку породы химическими средствами не применяют.

3. Агрегатный способ, при котором породу не подвергают ни механической, ни химической обработке. Подготовка ее

к анализу состоит только в размачивании в воде и соответственно разрушении неустойчивых крупных агрегатов.

При инженерно-геологических исследованиях песчаных и глинистых пород для предварительной подготовки их к гранулометрическому анализу следует применять только полудисперсный способ (ГОСТ 12536—79). Химические способы должны применяться в исключительных случаях для решения специальных вопросов, например, для определения степени изменения дисперсности пород при литификации, для выделения большого количества первичных частиц при исследовании их минерального состава и др. Для определения содержания в породе неустойчивых агрегатов производят гранулометрический анализ параллельно двух образцов, один при полудисперсном, другой при дисперсном способе подготовки к анализу.

Для того чтобы в процессе анализа исключить возможность образования агрегатов и получить правильное представление о гранулометрическом составе породы, при выполнении анализа применяют соответствующие приемы, которые указаны ниже, при описании хода анализа.

Из сказанного видно, что гранулометрический анализ должен давать характеристику естественной дисперсности пород. Поэтому, как уже отмечалось выше, он неприменим при изучении состава и строения коренных сцементированных пород, элювиальных и других подобных образований.

Ситовой метод

[Основной метод определения гранулометрического состава песчаных пород — ситовой.] Породу с помощью специального набора сит рассеивают на отдельные фракции. После этого определяют массу и процентное содержание в ней каждой фракции.]

Для определения гранулометрического состава породы ситовым методом необходимо иметь: 1) набор стандартных сит; 2) технические весы с разновесами; 3) фарфоровую ступку с резиновым наконечником; 4) фарфоровые чашечки, тигли или бюксы; 5) ложку или совок; 6) лист бумаги; 7) рабочий журнал (табл. II-2).

[Стандартный набор сит состоит из девяти сит с отверстиями 10; 7; 5; 3; 2; 1; 0,5; 0,25 и 0,1 мм.] Первые шесть сит должны быть штампованными или сверленными с отверстиями круглой формы. Сита с отверстиями 0,5; 0,25 и 0,1 мм обычно изготавливают из медной сетки простого плетения. Как исключение, допускаются сита из медной сетки с квадратными отверстиями 1,0 мм. Сита собирают в колонку так, чтобы отверстия их уменьшались сверху вниз. Под нижнее сито подставляют под-

Т а б л и ц а 11-2. Журнал для определения гранулометрического состава горных пород

Лабораторный номер									Показатели														Примечание
Дата									Фракции, мм														Примечание
Навеска, г																							
Влажность породы, %																							
Масса абсолютно-сухой породы, г																							
Номер стакана или цилиндра																							
Объем суспензии, см³																							
Объем пипетки, см³																							

дон, а на верхнее надевают крышку. Общий вид набора сит изображен на рис. II-1.

Последовательность определения

Общая схема гранулометрического анализа ситовым методом сводится к следующим операциям.

1. Пробу породы доводят до воздушно-сухого состояния, для чего рассыпают тонким слоем на листе бумаги и просушивают на воздухе в течение 1—2 сут.

2. Из воздушно-сухой породы отбирают среднюю пробу:
а) для пород, не содержащих частиц крупнее 2 мм,— 200 г;
б) для пород, содержащих гравий и гальку до 10 %,— 500 г;
в) для пород, содержащих гравий и гальку от 10 до 30 %,— 2000 г, при большем содержании — 3000 г.

3. Если в лабораторию поступила проба породы больше указанной массы, то среднюю пробу отбирают квартованием. Породу тщательно перемешивают, рассыпают тонким слоем и делят при помощи шпателя или обратным концом ложки двумя взаимно перпендикулярными линиями на четыре равные части (квадранты); два противоположных квадранта удаляют, а два других оставляют в качестве сокращенной пробы. Таким образом поступают до тех пор, пока не останется необходимая для анализа масса породы.

4. Если порода состоит из слипшихся комочков, ее растирают в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником. Растирать породу нужно осторожно, чтобы избежать разрушения отдельных зерен.



Рис. II-1. Набор сит.

5. Пробу породы взвешивают на технических весах. Общую массу ее записывают в рабочий журнал (см. табл. II-2). Для упрощения и удобства расчета анализа желательно, чтобы общая масса пробы была равна целым граммам.

6. Взвешенную породу помещают в колонну сит и осторожно встряхивают до тех пор, пока не будет достигнута полная сортировка частиц породы в ситах на фракции. Для проверки чистоты сортировки поступают следующим образом. Берут сито из колонны с отсортированной фракцией и ведут просеивание над листом бумаги; если отсеивание наблюдается, то отделение частиц данной фракции произошло недостаточно. Взятое сито включают в колонну сит и продолжают сортировку, а зерна породы, просеянные при проверке на лист бумаги, всыпают в сито нижележащей фракции. Проверку следует делать главным образом для мелких фракций, начиная с 3 мм.

7. При определении гранулометрического состава глинистых песков отбирают среднюю пробу, как указано в п. 2. Взвешенную пробу песка помещают в фарфоровую чашку и отмывают из него пылеватые и глинистые частицы. Для этого песок в фарфоровой чашке заливают водой и растирают пестиком с резиновым наконечником, а затем после некоторого отстаивания воды (30—60 с) верхний слой ее со взвешенными в ней пылевато-глинистыми частицами осторожно сливают. Последовательно повторяя таким образом промывку песка, продолжают ее до полного просветления слоя воды над песком.

Отстоявшийся в фарфоровой чашке промытый песок высушивают и затем просеивают через набор сит так, как указано в п. 6.

В результате рассеивания песка на ситах остаются следующие фракции.

Отверстия сит, мм	Фракции, мм	Отверстия сит, мм	Фракции, мм
10	>10	1	1
7	10—7	0,5	0,5
5	7—5	0,25	0,5—0,25
3	5—3	0,1	0,25—0,1
2	3—2		

Фракции менее 0,1 мм просеиваются через сито с отверстиями 0,1 мм и остаются в поддоне.

8. Фракции, оставшиеся после просеивания на ситах и в поддоне, собирают в предварительно взвешенные фарфоровые чашки или бюксы. Затем фарфоровые чашки с фракциями взвешивают на технических весах с погрешностью до 0,01 г и вычисляют чистую массу каждой фракции. Сумма всех фракций должна быть равна массе общей навески породы.

9. Зная общую массу навески, вычисляют процентное содержание каждой фракции по формуле

$$x = A \cdot 100/B,$$

где x — процентное содержание фракции в породе; A — масса фракции; B — общая масса навески.

Результаты анализа глинистых песков вычисляют также в процентах по отношению к массе воздушно-сухой пробы до промывки ее водой. Содержание фракций диаметром менее 0,1 мм вычисляют при этом по разности между общей массой навески и суммой масс всех более крупных фракций или между 100 % и суммой процентов всех более крупных фракций.

10. Если фракций диаметром менее 0,1 мм содержится в песке по массе более 10 %, то гранулометрический анализ должен быть продолжен одним из методов, описанных ниже, для разделения этих фракций на более мелкие.

11. Все данные записывают в журнал (см. табл. II-2), а окончательный результат — в сводную таблицу (см. приложение 3).

Метод А. Н. Сабанина

Метод Сабанина применим главным образом для определения гранулометрического состава мелкозернистых и тонкозернистых песков. Этим методом с достаточной точностью выделяют фракции диаметром более 0,1; 0,1—0,05; 0,05—0,01 мм и меньше. При содержании в песке более 10 % фракций диаметром менее 0,01 мм методом Сабанина пользоваться не рекомендуется; в этом случае следует применять пипеточный метод.

Метод Сабанина иначе называется методом двойного отмучивания, так как порода предварительно отмучивается в чашках, а затем в стакане прибора Сабанина. При отмучивании, как известно, частицы породы различной крупности осажда-

Т а б л и ц а II-3. Скорости падения частиц в воде, по Стоксу (при средней плотности частиц, принятой равной 2,65 г/см³)

Диаметр частиц, мм	Скорости падения частиц в воде (мм/с) при температуре воды, °С				
	10	12	15	17	20
0,05	1,71597	1,81284	1,96325	2,06610	2,22566
0,01	0,06864	0,07251	0,07853	0,08264	0,08903
0,005	0,01716	0,01813	0,01963	0,02066	0,02226
0,002	0,002746	0,00290	0,00314	0,003306	0,00356
0,001	0,000686	0,000725	0,000785	0,000826	0,000890

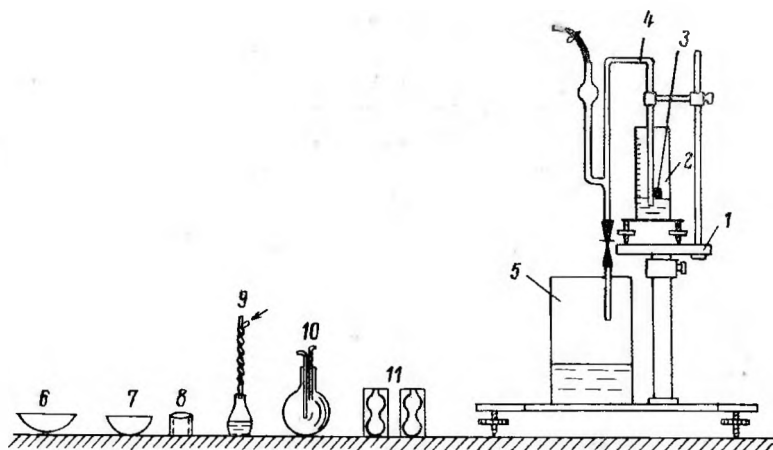


Рис. II-2. Прибор А. Н. Сабанина.

ются в воде с различной скоростью: частицы более крупные осаждаются быстрее, а более мелкие — медленнее. Для определения скорости падения частиц в воде пользуются формулой Стокса, приведенной выше. В настоящем руководстве учтены скорости, вычисленные по Стоксу (табл. II-3).

Для производства анализа по методу Сабанина необходимо иметь: 1) весы технические с разновесами; 2) прибор Сабанина; 3) фарфоровую ступку и пестик с резиновым наконечником; 4) бюксы или фарфоровые тигли; 5) часы и секундомер; 6) сушильный шкаф; 7) песчаную или водяную баню; 8) термометр с делениями до $0,5^{\circ}\text{C}$; 9) ложку; 10) кисточку для очистки сит и бумаги от фракций; 11) раствор 25 %-ного аммиака; 12) лист бумаги; 13) журнал определенной формы (см. табл. II-2).

Прибор Сабанина, изображенный на рис. II-2, состоит из штатива 1, на стойку которого привинчивают столик в строго горизонтальном положении; градуированного стакана 2 для отмучивания, на котором снизу вверх нанесены деления через 1 см; равноколенного сифона 4 с двумя зажимами для сливания суспензии; конец сифона, погруженный в градуированный стакан 2, рекомендуется обвязывать металлической тканью (сеткой с отверстиями $0,25\text{ мм}$), которая позволяет сифону лучше удерживать заключенную в нем жидкость; двух батарейных банок 5 емкостью 5 л; фарфоровых чашек большого 6 и малого 7 размера; сита 8 с отверстиями $0,1\text{ мм}$; колбочки 9 емкостью 300 см^3 с обратным холодильником; промывалки 10; мешалки 3; песочных часов 11 на 60 и 30 с.

Последовательность определения

Общая схема гранулометрического анализа по методу Сабанина сводится к следующим операциям.

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

2. Из растертой породы берут среднюю пробу, производят ситовой анализ и вычисляют процентное содержание фракции диаметром более 0,25 мм.

3. Из части породы, прошедшей через сито с диаметром отверстий 0,25 мм, берут среднюю пробу массой 5—6 г для определения содержания более мелких фракций. Эту пробу взвешивают на технических весах. Одновременно с пробой для гранулометрического анализа берут пробу в бюкс для определения влажности породы (см. гл. III, § 5) и пересчета массы пробы, взятой на анализ, на абсолютно-сухую массу по формуле

$$b = B \cdot 100 / (100 + W),$$

где b — масса навески породы в абсолютно-сухом состоянии, г;
 B — масса навески породы в воздушно-сухом состоянии (с гигроскопической влагой) или при естественной влажности, г;
 W — влажность породы, %.

При определении гранулометрического состава глинистых песков их пробы необходимо доставлять в лабораторию при естественной влажности. Навеску для анализа берут 5—6 г. Она должна отражать средний состав породы. Для этого доставленный образец породы очищают от упаковочного материала и продольными срезами отделяют необходимый объем. Одновременно с пробой для определения гранулометрического состава породы отбирают пробу для определения ее влажности. Затем анализ продолжают так, как указано в пунктах 4, 5 и т. д.

4. Навеску породы помещают в колбу 9 с обратным холодильником, заливают десятикратным количеством дистиллированной воды, к которой прибавляют 1 см³ аммиака, и кипятят в течение часа на песчаной или водяной бане.

5. Остывшую суспензию пропускают через сито 8 с отверстиями 0,1 мм, установленное в большой фарфоровой чашке 6. Уцелевшие после кипячения агрегаты растирают пальцем или мягким резиновым пестиком. Переводя суспензию в сито, необходимо следить, чтобы на стенках колбы не осталось частиц, для чего колбу тщательно промывают из промывалки 10.

6. Частицы диаметром 0,25—0,1 мм, не прошедшие через сито, тщательно промывают, а затем переносят в предварительно взвешенный бюкс или чашку. Воду в чашке выпаривают

на песчаной бане, а осадок высушивают в термостате и взвешивают на технических весах (предварительно охладив чашку с осадком в эксикаторе). Затем вычисляют процентное содержание x фракции 0,25—0,1 мм в породе по формуле

$$x = Ac/b,$$

где A — масса фракции, г; c — суммарное процентное содержание фракций диаметром менее 0,25 мм, полученное в результате ситового анализа (при отсутствии в породе фракций диаметром более 0,25 мм $c = 100\%$); b — масса взятой навески, пересчитанная на абсолютно-сухое состояние породы, г.

7. Вся суспензия, прошедшая через сито с отверстиями 0,1 мм в большую фарфоровую чашку 6, подвергается отмучиванию в фарфоровых чашках 6 и 7 и градуированном стакане 2 прибора Сабанина, который устанавливают для этого следующим образом. На столик, привинченный к стойке штатива 1 прибора, ставят градуированный стакан 2. В него опускают предварительно наполненный водой сифон 4 так, чтобы его конец был установлен точно на уровне 2 см от дна стакана; в таком положении сифон прочно закрепляют. Под другой конец сифона устанавливают одну из батарейных банок 5.

8. Измеряют температуру суспензии в большой фарфоровой чашке 6, затем суспензию взмучивают мешалкой 3 и оставляют в покое на 30 с.

9. По истечении 30 с неосевшую муть из большой фарфоровой чашки переливают в малую фарфоровую чашку 7. Суспензию в малой фарфоровой чашке взбалтывают мешалкой и оставляют в покое на 60 с.

10. По истечении 60 с неосевшую муть из малой фарфоровой чашки 7 сливают в градуированный стакан 2 до уровня 8 см от дна стакана. В том случае, если суспензии недостаточно, чтобы долить до указанного уровня, повторяют отмучивание породы в чашках, добавляя в первую (большую из них) чистой воды из промывалки 10, и затем доливают суспензию в стакан до необходимого уровня.

При отмучивании суспензии в чашках нельзя допускать сливания отстоявшихся осадков при переливании суспензии из чашки в чашку и в градуированный стакан.

11. Суспензию в градуированном стакане взмучивают мешалкой и оставляют в покое для отстаивания на время, указанное в табл. II-4.

12. По истечении времени, указанного в табл. II-4, сливают столб жидкости из градуированного стакана 2 при помощи сифона 4 в батарейную банку 5 до уровня 2 см от дна стакана. За это время частицы диаметром более 0,01 мм успеют пройти столб воды, находящийся выше 2 см от дна стакана, и в нем останутся только частицы диаметром менее 0,01 мм, которые

Т а б л и ц а II-4. Время отстаивания суспензии при отмучивании фракций диаметром менее 0,01 мм

Температура суспензии, °С	Время отстаивания суспензии
10	14 мин 34 с
12	13 47
15	12 44
17	12 06
20	11 14

Т а б л и ц а II-5. Время отстаивания суспензии при отмучивании фракции диаметром 0,05—0,01 мм

Температура суспензии, °С	Время отстаивания суспензии, с
10	35
12	33
15	31
17	29
20	27

будут слиты в батарейную банку и тем самым отделены от более крупных.

13. Отмучивание в чашках продолжают до тех пор, пока вода с осадком в большой чашке через 30 с, а в малой через 60 с после отмучивания не станет совершенно прозрачной. Когда этот момент будет отмечен, все содержимое большой чашки с помощью промывалки переносят в малую чашку, а содержимое последней — в градуированный стакан. После этого отмучивание продолжают только в стакане, подливая в него чистой воды из промывалки.

Предварительное отмучивание породы в чашках производят для того, чтобы ускорить ее разделение на фракции.

14. Отмучивание в стакане продолжают до тех пор, пока столб воды, находящийся выше 2 см от его дна, после взбалтывания и отстаивания в течение промежутка времени, указанного в табл. II-4, не станет совершенно прозрачным; этим достигается полное отделение частиц диаметром менее 0,01 мм. Эти частицы будут слиты с водой в батарейную банку, и для дальнейшего разделения их на более мелкие фракции должен быть применен пипеточный метод.

15. После отделения частиц диаметром менее 0,01 мм в градуированном стакане останутся фракции размером 0,1—0,05 и 0,05—0,01 мм. Разделение этих фракций продолжают отмучиванием в градуированном стакане, для чего под сифон 4 подставляют другую батарейную банку 5, а в стакан доливают чистой воды до уровня 8 см от дна стакана.

16. Суспензию в градуированном стакане взбалтывают мешалкой и оставляют в покое для отстаивания на время, указанное в табл. II-5.

17. По истечении указанного времени (см. табл. II-5) сливают столб жидкости из градуированного стакана 2 при помощи сифона 4 в батарейную банку до уровня 2 см от дна стакана. За это время фракция более крупная (0,1—0,05 мм)

успеет осесть на дно стакана, а фракция более мелкая (0,05—0,01 мм) останется выше уровня 2 см от дна стакана и будет слита в батарейную банку.

18. Отмучивание в стакане продолжают до тех пор, пока при отстаивании суспензии в течение времени, указанного в табл. II-5, после взбалтывания и отстаивания столб жидкости, находящийся выше уровня 2 см от дна стакана, не будет содержать взвешенных частиц, т. е. будет совершенно прозрачным. На этом заканчивают разделение фракций 0,1—0,05 и 0,05—0,01 мм и весь процесс отмучивания.

В результате анализа породы по методу Сабанина получают следующие фракции: более 0,1 мм — то, что осталось на сите с диаметром отверстий 0,1 мм; менее 0,01 — то, что было слито в первую батарейную банку; 0,05—0,01 мм — то, что было слито во вторую батарейную банку; 0,1—0,25 мм — то, что осталось в осадке в градуированном стакане после отмучивания.

19. Из градуированного стакана с помощью сифона осторожно, не взмучивая осадка, сливают лишнюю воду. Оставшийся на дне стакана осадок переносят в предварительно взвешенный бюкс или чашку, из которой затем выпаривают воду, а осадок высушивают и взвешивают на технических весах (предварительно охладив чашку с осадком в эксикаторе). Затем вычисляют процентное содержание фракции 0,1—0,05 мм по формуле, приведенной в п. 6. Таким же путем выделяют фракцию 0,05—0,01 мм, находящуюся во втором батарейном стакане. Процентное содержание фракции 0,05—0,01 мм вычисляют по той же формуле.

20. Процентное содержание фракции менее 0,01 мм вычисляют по разности, для чего из 100 % вычитают сумму процентов всех более крупных фракций, т. е. фракций, определенных ситовым методом и в приборе Сабанина.

21. Все полученные в процессе выполнения анализа цифровые данные записывают в журнал, а окончательный результат — в сводную таблицу (см. приложение 3).

Пипеточный метод

Пипеточный метод применим главным образом для определения гранулометрического состава глинистых пород (глин, суглинков и т. п.), но он с успехом может быть использован и для анализов пород супесчаных и мелкопесчаных. Этим методом с достаточной точностью определяют содержание в породе фракций диаметром более 0,1; 0,1—0,05; 0,05—0,01; 0,01—0,002; 0,002—0,001 мм и менее 0,001 мм. При наличии в породе более крупных фракций этот метод должен применяться в комбинации с ситовым. Как уже указывалось выше, пипеточный

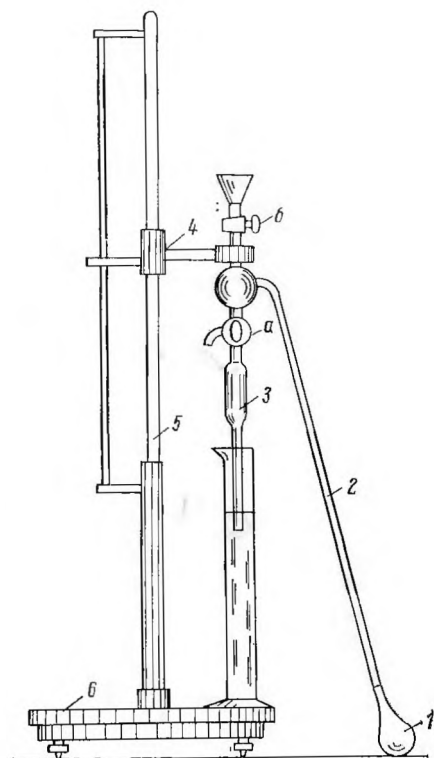


Рис. II-3. Установка для определения гранулометрического состава породы пипеточным методом.

1 — резиновая груша; 2 — резиновая трубка; 3 — пипетка с трехходовым (а) и обычным двухходовым (б) кранами; 4 — держатель пипетки; 5 — штатив; 6 — вращающийся столик для установки цилиндров с суспензией.

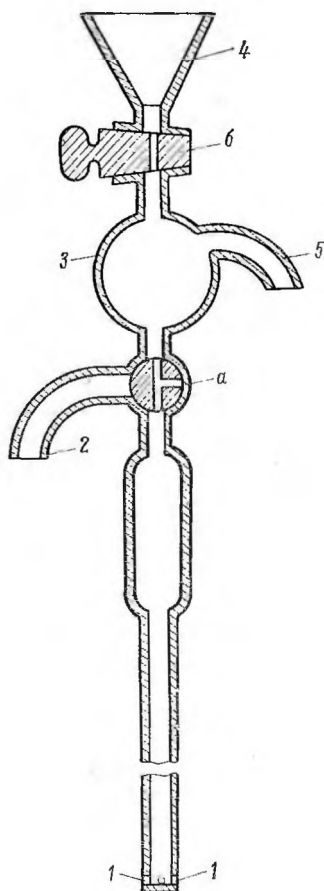


Рис. II-4. Пипетка конструкции М. И. Захарьева.

метод может применяться в комбинации с методом Сабанина, при этом пипеточным методом определяют содержание только фракций менее 0,01 мм.

При пипеточном методе, так же как и при методе Сабанина, разделение частиц породы на фракции основано на различной скорости падения их в воде при отмучивании. [Скорость падения частиц породы определяют по формуле Стокса] В процессе

отмучивания породы фракции определяют путем взятия пробы пипеткой из приготовленной суспензии с определенной глубины (рис. II-3).

Для проведения гранулометрического анализа пипеточным методом необходимо иметь: 1) технические весы с разновесами; 2) аналитические весы с разновесами; 3) цилиндр вместимостью 1200—1300 см³, высотой 45 см, диаметром 6 см; 4) пипетку на 25 см³; 5) колбу плоскодонную вместимостью 250 см³ с обратным холодильником; 6) фарфоровую чашку диаметром 16 см; 7) бюксы или фарфоровые тигли; 8) сито с отверстиями 0,1 мм; 9) фарфоровую ступку с резиновым наконечником; 10) сушильный шкаф; 11) песчаную или водяную баню; 12) промывалку или резиновую грушу; 13) мешалку; 14) раствор 25 %-ного аммиака; 15) насыщенный раствор пирофосфата натрия; 16) секундомер, часы; 17) термометр с делениями до 0,5 °C; 18) лист бумаги; 19) журнал (см. табл. II-2).

Для взятия проб суспензии рекомендуем пипетку конструкции М. И. Захарьева (рис. II-4). Нижний конец этой пипетки запаян, жидкость поступает в нее через диаметрально расположенные у конца пипетки боковые отверстия 1. На 5 см выше цилиндрического утолщения пипетки впаян трехходовой стеклянный кран *a* и отводящая трубка 2. Выше имеются шарообразное утолщение 3 и вторая отводящая трубка 5, которая через шланг соединяется с резиновой грушей (см. рис. II-3). Еще выше расположены обыкновенный стеклянный кран *b* и воронка 4 для промывания пипетки сверху вниз. Пипетку следует промывать каждый раз после взятия пробы суспензии. Каждую пипетку тарируют, объем ее определяют с погрешностью до 0,01 см³ (весовым методом по 10 пробам воды).

Для взятия пробы нижний конец пипетки погружают в суспензию на соответствующую глубину. Кран *b* пипетки перекрывают, а кран *a* ставят в положение I (рис. II-5). Затем резиновую грушу сжимают, кран ставят в положение II, и суспензия всасывается в пипетку до тех пор, пока не займет положение выше крана. После этого кран поворачивают, ставят в положение I и пипетку извлекают из суспензии. Лишнюю суспензию, расположенную в пипетке выше крана *a*, выдувают через отводящую трубку 2, а суспензию, находящуюся ниже крана, спускают в предварительно взвешенный бюкс или тигель, для чего кран *a* устанавливают в положение III.

Последовательность определения

Общая схема гранулометрического анализа пипеточным методом сводится к следующим операциям.

1. Образцы пород, особенно глинистых, для определения гранулометрического состава этим методом должны достав-

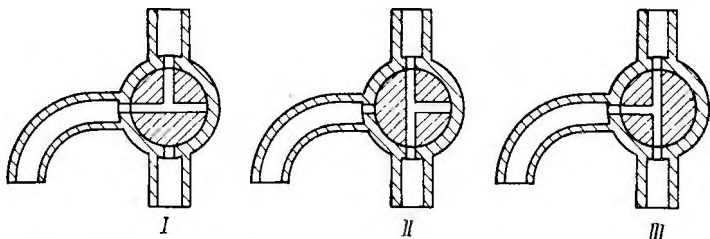


Рис. II-5. Три рабочих положения крана *a* пипетки конструкции М. И. Захарьева.

I — при подготовке пипетки для ваятия пробы суспензии; *II* — при всасывании суспензии пипеткой; *III* — при сливании суспензии из пипетки.

ляться в состоянии естественной влажности. Их очищают от упаковочного материала и продольными срезами отделяют необходимый для анализа объем породы, который должен отражать средний ее состав.

2. Из части породы, отделенной для анализа, берут навеску в таком количестве, чтобы при пересчете на абсолютно-сухую массу она равнялась для глин около 10 г, для суглинков 15 г, для супесчаных и песчаных пород от 20 до 40 г. При наличии в породах значительного количества фракций диаметром более 0,1 мм (устанавливается визуально) берут отдельную навеску на ситовой анализ. Одновременно с пробой для гранулометрического анализа берут пробу для определения влажности породы (см. гл. III, § 5).

Пересчет массы пробы, взятой на анализ, на абсолютно-сухую массу производят по формуле

$$b = B \cdot 100 / (100 + W),$$

где *b* — масса навески породы в абсолютно-сухом состоянии, г; *B* — масса навески породы естественной влажности, г; *W* — влажность породы, %.

3. Навеску породы, взятую на анализ, помещают в колбу с обратным холодильником и заливают десятикратным количеством дистиллированной воды; в колбу прибавляют 1 см³ аммиака и приготовленную таким образом суспензию кипятят в течение часа на песчаной или водяной бане.

4. Остывшую суспензию выливают в большую фарфоровую чашку, тщательно промывают колбу, чтобы на стенках ее не осталось частиц породы.

5. Суспензию в чашке взмучивают и оставляют в покое на 1—2 мин. По истечении указанного времени отстоявшийся слой суспензии сливают в большой мерный цилиндр (вместимостью 1 л) через сито с диаметром отверстий 0,1 мм, установленное в большую воронку, а осадок растирают мягким резиновым пе-

стиком или пальцем для разрушения уцелевших после кипячения агрегатов. Затем в чашку приливают чистой воды из промывалки, осадок вновь взмучивают и через 1—2 мин отстаившийся слой суспензии сливают в цилиндр через сито. Отмучивание в чашке и растирание в ней осадка продолжают до тех пор, пока после 1—2 мин отстаивания слой воды над осадком не будет совершенно прозрачным, а в осадке останутся только песчаные фракции. После этого весь осадок из чашки смывают на сито, установленное над цилиндром в большой воронке. Затем в цилиндр доливают чистой воды в таком количестве, чтобы общее количество суспензии оказалось равным 1 л. На этом заканчивают подготовку суспензии для дальнейшего анализа.

6. Песчаные фракции, оставшиеся на сите с диаметром отверстий 0,1 мм, смывают в маленькую фарфоровую чашку или тигель и воду выпаривают, а осадок высушивают и просеивают через набор сит. Затем каждую фракцию взвешивают на технических весах и вычисляют процентное содержание ее в породе по формуле

$$x = Ac/b,$$

где A — масса фракции, г; c — суммарное процентное содержание фракций, взятых на анализ [если не было отдельного ситового анализа, то c всегда равно 100 %; если был отдельный ситовый анализ, а для анализа пипеточным методом был взят мелкозем (фракции < 0,25 мм), то c равно 100 % минус суммарное процентное содержание фракций крупнее 0,25 мм]; b — масса взятой навески, пересчитанная на абсолютно-сухое состояние породы, г.

7. Измерив температуру суспензии в цилиндре, ее взмучивают мешалкой до полного исчезновения осадка на дне цилиндра и оставляют в покое на время, указанное в табл. II-6.

Т а б л и ц а II-6. Время отстаивания суспензии

Проба (фракции)	Температура, °C				
	10	12	15	17	20
Первая (< 0,05 мм)	58 с	55 с	51 с	48 с	45 с
Вторая (< 0,01 мм)	24 мин 18 с	22 мин 59 с	22 мин 14 с	20 мин 9 с	18 мин 44 с
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 15 мин	19 ч 9 мин	17 ч 42 мин	16 ч 48 мин	15 ч 36 мин

8. По истечении указанного времени из цилиндра осторожно, не взбалтывая суспензии, берут первую пробу суспензии пипеткой с глубины 10 см. За это время частицы диаметром крупнее 0,05 мм успевают осесть ниже указанной глубины, а в столбе суспензии до глубины 10 см должны остаться частицы диаметром менее 0,05 мм. Следовательно, в суспензии, отобранной пипеткой, должны содержаться частицы диаметром только менее 0,05 мм.

9. Содержимое пипетки сливают в предварительно взвешенный тигель или бюкс, воду выпаривают, осадок высушивают и взвешивают на аналитических весах, предварительно охладив его в эксикаторе. Затем вычисляют суммарное процентное содержание фракций диаметром менее 0,05 мм по следующим формулам:

$$A = aV/V_1; \quad x = Ac/b \quad \text{или} \quad x = aVc/(bV_1),$$

где A — масса частиц диаметром менее 0,05 мм, пересчитанная на весь объем суспензии; a — масса частиц диаметром менее 0,05 в объеме пипетки (масса высушенной пробы); V — объем суспензии в цилиндре; V_1 — объем суспензии в пипетке; 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 всегда равно 100 % (см. п. 6)]; b — масса навески, взятой для анализа по методу пипетки, пересчитанная на абсолютно-сухое состояние.

10. Измерив температуру суспензии в цилиндре, ее вновь взмучивают до полного исчезновения осадка на дне цилиндра специальной мешалкой и оставляют в покое на время, указанное в табл. II-6.

11. По истечении указанного времени из цилиндра берут вторую пробу пипеткой с глубины 10 см от поверхности суспензии в цилиндре. Вторая проба суспензии будет содержать частицы диаметром только менее 0,01 мм. Суспензию из пипетки сливают в предварительно взвешенный бюкс или тигель, выпаривают, осадок высушивают и взвешивают на аналитических весах. Затем вычисляют суммарное процентное содержание фракций менее 0,01 мм по формулам, приведенным в п. 9.

12. Взмучивание и отстаивание суспензии в цилиндре повторяют еще два раза, после чего отбирают пипеткой третью и четвертую пробы с глубины 5 см. Третьей пробой определяют суммарное процентное содержание в породе фракций диаметром менее 0,002 мм, а четвертой пробой — содержание фракций диаметром менее 0,001 мм. Время отстаивания суспензии после взмучивания перед отбором третьей и четвертой проб указано в табл. II-6.

13. Определив суммарное процентное содержание в породе фракций диаметром $<0,05$, $<0,01$, $<0,002$ и $<0,001$ мм, вычисляют содержание в породе каждой фракции следующим образом:

а) содержание в породе фракций диаметром $0,05—0,01$ мм вычисляют по разности между процентным содержанием фракции $<0,05$ и $<0,01$ мм, т. е. по разности первой и второй проб;

б) содержание в породе фракций диаметром $0,01—0,002$ мм вычисляют по разности между процентным содержанием фракций $<0,01$ и $<0,002$ мм, т. е. по разности второй и третьей проб;

в) содержание в породе фракций диаметром $0,002—0,001$ мм вычисляют по разности между процентным содержанием фракций $<0,002$ и $<0,001$ мм, т. е. по разности третьей и четвертой проб;

г) содержание в породе фракции $<0,001$ мм соответствует процентному содержанию четвертой пробы;

д) содержание в породе фракции диаметром $0,1—0,05$ мм вычисляют по разности между 100% и суммой процентов всех фракций, оставшихся на сите с отверстиями $0,1$ мм и определенных методом пипетки;

е) содержание фракций диаметром $>0,1$ мм равно тому, что осталось на сите с отверстиями $0,1$ мм.

14. Все полученные в процессе выполнения анализа цифровые данные записывают в журнал определенной формы (см. табл. II-2), а окончательный результат — в сводную таблицу (приложение 3).

Метод анализа засоленных пород

Некоторые породы, главным образом глинистые, в своем составе содержат растворимые в воде соли. Суспензия, приготовленная из засоленных пород, коагулирует, поэтому их granulометрический анализ всегда вызывает затруднения или становится даже невозможным. Коагуляция проявляется в том, что суспензия после некоторого периода отстаивания расслаивается — верхний ее слой просветляется и резко отделяется от нижнего мутного слоя. Чем сильнее засолена порода, тем быстрее происходит расслоение суспензии, тем быстрее выпадает из нее осадок. Для выполнения анализа такой породы следует устранить коагуляцию. Это достигается одним из следующих способов:

- 1) приготовлением суспензии малой концентрации;
- 2) отмыванием солей из суспензии — декантацией;
- 3) разбавлением суспензии, если недостаточны вышеуказанные мероприятия;
- 4) применением стабилизаторов суспензии.

Для определения гранулометрического состава засоленных пород целесообразнее применять пипеточный метод. Необходимое оборудование для анализа этим методом указано выше. Общая схема гранулометрического анализа при этом сохраняется та же, что и для незасоленных пород, но подготовка суспензии отличается.

Последовательность определения

1. Образцы породы подвергаются подготовке, как и для анализа методом пипетки. При этом навеска породы для анализа при пересчете на абсолютно-сухую массу должна быть для глин около 5 г, для суглинков 6—7 г, для супесчаных и песчаных пород от 10 до 25 г.

2. Приготавливают суспензию в стеклянном цилиндре так же, как для анализа методом пипетки (см. пункты 3—6). Общий объем суспензии предварительно должен быть около 1 л (950—970 см³). Следовательно, концентрация суспензии получается в этом случае примерно в два раза меньше по сравнению с концентрацией суспензии, приготовляемой из пород незасоленных.

3. Если после некоторого периода времени отстаивания суспензии (16—18 ч) в цилиндре явных признаков коагуляции обнаружено не будет, в нее добавляют 5 см³ насыщенного раствора пирогосфата натрия (1 см³ раствора на 1 г навески породы) для лучшей стабилизации суспензии; затем в цилиндр до метки доливают дистиллированной воды, чтобы общий объем суспензии был равен 1 л, и на этом заканчивают подготовку суспензии для анализа пипеточным методом.

4. Если суспензия после указанного периода отстаивания скоагулировала — расслоилась, необходимо ее подвергнуть предварительно двух- или трехразовой декантации. Для этого осторожно, не взбалтывая суспензию, сливают сифоном верхний отстоявшийся прозрачный слой жидкости в чистую стеклянную банку. Затем доливают в цилиндр дистиллированной воды так, чтобы объем суспензии был около 1 л (950—970 см³), взмучивают ее и оставляют в покое для отстаивания, и, если необходимо, повторяют декантацию второй и третий раз (обычно достаточно произвести декантацию один раз). Добившись таким образом устранения явно видимой коагуляции, заканчивают подготовку суспензии для анализа. В суспензию добавляют 5 см³ насыщенного раствора пирогосфата натрия для лучшей стабилизации суспензии и затем дистиллированной воды, чтобы общий объем суспензии был равен 1 л.

5. При декантации происходит отмыв солей из суспензии, т. е. из породы, из которой она приготовлена. При расчете про-

центного содержания фракций в породе необходимо учитывать количество отмытых солей, так как масса навески породы

$$g = g_n + g_c,$$

где g — масса абсолютно-сухой породы, из которой приготовлена суспензия; g_n — масса нерастворимой части навески породы; g_c — масса солей, перешедших в раствор и слитых при декантации.

Чтобы определить массу солей, отмытых из породы, измеряют общий объем жидкости, слитой при декантации, затем отбирают из нее в предварительно взвешенный тигель или стеклянный бюкс две пробы жидкости по 100 см³. Обе пробы выпаривают на песчаной бане, высушивают в термостате, взвешивают и затем вычисляют массу отмытых солей по формуле

$$g_c = g_1 V / 200,$$

где g_c — масса солей, перешедших в раствор и слитых при декантации; g_1 — масса сухого остатка (солей) в объеме 200 см³ жидкости, слитой при декантации; V — общий объем жидкости, слитой при декантации.

Определив массу солей, отмытых из породы, вносят поправку в массу навески породы, взятой для приготовления суспензии, т. е.

$$g_p = g - g_c,$$

где g_p — масса абсолютно-сухой навески породы с учетом поправки на растворимые соли (расчетная навеска).

6. В том случае, если после первого отстаивания суспензии будет обнаружена сильная коагуляция (в цилиндре нижний мутный слой суспензии занимает 1/4 его высоты, или частицы полностью выпали в осадок), для устранения ее одной декантации обычно недостаточно, то необходимо понизить концентрацию суспензии. Для этого осторожно сливают отстоявшийся верхний прозрачный слой жидкости из цилиндра и в него доливают дистиллированной воды ровно до метки. т. е. чтобы объем суспензии был равен 1 л. Затем тщательно взмучивают суспензию до полного исчезновения осадка на дне цилиндра и половину ее быстро сливают. Оставшуюся половину суспензии разбавляют дистиллированной водой так, чтобы общий ее объем был равен около 1 л (950—970 см³). Далее продолжают подготовку суспензии к анализу, как указано выше (п. 4).

7. Для определения количества солей, отмытых в этом случае, поступают следующим образом. Берут ровно половину жидкости, слитой при декантации до разбавления суспензии, и в нее сливают жидкость при повторных декантациях (если будет в этом необходимость), т. е. после отстаивания разбавленной суспензии. Таким образом получают общий объем жид-

кости V, слитой при декантации. Далее продолжают так, как указано выше (см. п. 5).

8. Подготовив суспензию в цилиндре, продолжают анализ пипеточным методом (см. пункты 6—8 и т. д.).

9. При вычислении процентного содержания фракций в породе необходимо учитывать поправку на содержание в суспензии насыщенного раствора пирофосфата натрия. Величина этой поправки определяется следующим образом. В литровый цилиндр наливают дистиллированной воды, в которую добавляют 5 см³ насыщенного раствора пирофосфата натрия так, чтобы общий объем раствора в цилиндре был равен 1 л. Затем из цилиндра отбирают пипеткой три пробы, так же как отбирались пробы суспензии. Выпарив отобранные пробы и затем высушив сухой остаток в термостате, определяют количество пирофосфата натрия в объеме пипетки — среднее из трех проб. Это количество пирофосфата вычитают из массы осадка каждой пробы суспензии в объеме пипетки. Таким образом учитывается поправка на содержание в суспензии пирофосфата натрия.

Если при подготовке суспензии концентрация ее изменялась разбавлением, при расчете процентного содержания фракций это надо учитывать. Например, первоначальная навеска была 5 г, суспензию разбавили в два раза (половина суспензии была слита), следовательно, в суспензии осталось породы 2,5 г минус соли, перешедшие в раствор и слитые при декантации. Весь расчет следует проводить исходя из величины этой навески.

Комбинированный метод

Комбинированный метод применим для определения гранулометрического состава мелкопесчаных и супесчаных пород. Этот метод рекомендуется для пород, в которых содержание частиц диаметром менее 0,01 мм составляет не более 10 %. При большем содержании в породах фракций диаметром менее 0,01 мм лучше пользоваться пипеточным или ареометрическим методом. Сущность комбинированного метода состоит в том, что для определения гранулометрического состава породы применяют вначале метод Сабанина, а затем пипеточный. При этом по методу Сабанина определяют содержание фракций диаметром более 0,01 мм, а пипеточным методом — содержание фракций диаметром менее 0,01 мм. Для выполнения анализа комбинированным методом необходимо иметь оборудование, указанное выше.

Общая схема анализа комбинированным методом сводится к следующим операциям.

1. Образец породы подвергают подготовке, как и для анализа методом Сабанина.

2. Из подготовленной породы берут среднюю пробу, готовят суспензию и выполняют анализ по методу Сабанина.

3. Суспензию, слитую в процессе анализа методом Сабанина из градуированного стакана в первую батарейную банку и содержащую фракции диаметром менее 0,01 мм, сливают в 5-литровую бутыль. Общий объем суспензии в бутылки должен быть равен 2,5—3 л. В том случае, когда количество суспензии, слитой в бутылку, окажется меньше указанного объема, прибавляют чистой дистиллированной воды.

4. Бутылку плотно закрывают пробкой и суспензию, находящуюся в ней, взбалтывают в течение 1 мин, а затем переливают в большой мерный цилиндр емкостью 1,2—1,3 л. Общее количество суспензии в цилиндре должно быть равно 1 л. Суспензию переливают в цилиндр небольшими порциями, время от времени взбалтывая ее в бутылки для того, чтобы плотность переливаемой суспензии была одинаковой.

5. Подготовив суспензию в цилиндре, продолжают анализ пипеточным методом, определяя вначале содержание фракций диаметром менее 0,002 мм, а затем диаметром менее 0,001 мм. Определив содержание этих фракций, анализ заканчивают.

6. Вычисление процентного содержания фракций в породе при комбинированном методе анализа производят следующим образом.

А. Для фракций диаметром менее 0,01 мм пользуются формулой

$$x = Acl/b,$$

где A — масса фракции; c — суммарное процентное содержание фракций, взятых на анализ [если не было отдельно ситового анализа, то c всегда равно 100 %; если был отдельно ситовой анализ, а для анализа комбинированным методом был взят мелкозем (фракции менее 0,25 мм), то c равно 100 % минус суммарное содержание фракций более 0,25 мм]; b — масса взятой навески, пересчитанная на абсолютно-сухое состояние породы.

Б. Для фракций диаметром $<0,002$ мм пользуются формулой

$$x = aVc/(bV_1),$$

где x — процентное содержание в породе частиц диаметром $<0,002$ или $<0,001$ мм; a — масса частиц диаметром $<0,002$ или $<0,001$ мм в объеме пипетки (масса высушенной пробы); V — объем суспензии в цилиндре; V_1 — объем суспензии в пипетке; c — суммарное процентное содержание фракций диаметром $<0,01$ мм, полученное в результате анализа по методу Сабанина; b — масса навески, взятой для анализа, пересчитанная на абсолютно-сухое состояние породы.

Т а б л и ц а П-7. Признаки для определения гранулометрического вида пород

Породы	Ощущение при растирании породы пальцами на ладони рук	Вид растертой массы породы на ладони при наблюдении в лупу, а также простым глазом
1	2	3
Глины	Очень трудно растираются в порошок	Однородная тонкопорошковая масса, не содержащая частиц крупнее 0,25 мм
Суглинки	Растертая на ладони масса не дает ощущения однородного порошка	Среди преобладающих пылевато-глинистых частиц ясно видны песчаные частицы крупнее 0,25 мм
Супеси	Неоднородный порошок, в котором ясно чувствуется присутствие песка	Преобладают песчаные частицы крупнее 0,25 мм, более мелкие являются примесью
Пески	Ощущение песчаной массы	Состоит почти нацело из зерен песка
Гравий	—	Присутствие большого количества частиц крупнее 2 мм; при содержании последних свыше 50 % разности получают название «гравий»

В. Содержание в породе фракций диаметром 0,01—0,002 мм вычисляют по разности между процентным содержанием фракций диаметром $<0,01$ и $<0,002$ мм.

Г. Содержание в породе фракций диаметром 0,002—0,001 мм вычисляют по разности между процентным содержанием фракций $<0,002$ и $<0,001$ мм.

Д. Содержание в породе фракций $<0,001$ мм соответствует процентному содержанию последней пробы.

(по М. М. Филатову)

Состояние сухой породы	Состояние влажной породы	Отношение породы к скатыванию	Другие признаки
4	5	6	7
Твердые комья не рассыпаются от удара молотком в порошок и при давлении рукой	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
Комья легко разваливаются при ударе молотком и при давлении рукой	Пластичное	Длинного шнура не дают. Шнур при сгибании образует трещины. Скатываются в шарик	То же, но чувствуется присутствие песчинок
Комья легко рассыпаются от давления рукой и при растирании	Слабопластичное	Скатываются в шнур. Шарик образует трещины на поверхности и осыпается	При резании ножом в сыром состоянии дают шероховатую поверхность
Сыпучее	Непластичное. При незначительном увлажнении обладает небольшой кажущейся связностью. При переувлажнении переходит в текучее состояние	Не скатываются в шнур и шарик	—
Сыпучее	—	—	—

Визуальный метод

Для полевого визуального определения гранулометрического состава пород следует пользоваться данными, приведенными в табл. II-7. С помощью этой таблицы представляется возможным выделять следующие разности пород по гранулометрическому составу: глину, суглинок, супесь, песок и гравий. Хотя никаких цифровых данных о процентном содержании

в породе тех или иных фракций этот метод не дает, правильное отнесение глинистых пород к глинам, суглинкам или супесям следует считать уже вполне достаточным для предварительной классификации четвертичных отложений и для суждения об их составе.

Последовательность определения

1. Исследуемую породу берут на ладонь, растирают пальцами и рассматривают в лупу. Затем, пользуясь данными, приведенными в графах 2—4 табл. II-7, судят о гранулометрическом виде породы.

2. Производят испытания той же породы в соответствии с указаниями, приведенными в графах 5—7, после чего дают породе окончательное наименование по графе 1.

3. Если исследуемая порода является песком или гравием, то для суждения о ее составе определяют размер зерен под лупой. Название породе дают в зависимости от преобладания в ней зерен того или иного размера [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.].

Ареометрический метод

Ареометрический метод гранулометрического анализа пород основан на измерении плотности приготовленной из них суспензии в процессе ее отстаивания. Если во взмученную суспензию опустить ареометр, то в процессе отстаивания плотность ее будет изменяться в связи с выпадением из нее частиц породы и ареометр будет погружаться в суспензию. Ареометрическим методом можно определять содержание в породе фракций диаметром менее 0,25 мм. Содержание фракций более 0,25 мм определяют ситовым методом.

Для производства гранулометрического анализа ареометрическим методом необходимо иметь: 1) ареометр; 2) мерный цилиндр на 1200—1300 см³, высотой около 45 см, диаметром 6 см; 3) набор сит с обязательным наличием сита с диаметром отверстий 0,1 мм; 4) весы технические с разновесами; 5) бюксы или фарфоровые тигли, предварительно взвешенные; 6) чашку фарфоровую диаметром 15—16 см; 7) термометр с делениями до 0,5 °C; 8) промывалку или резиновую грушу; 9) песчаную или водяную баню; 10) раствор 25 %-ного аммиака; 11) колбу вместимостью 250 см³ с обратным холодильником; 12) секундомер; 13) ступку с пестиком; 14) асбестовую сетку; 15) номограмму для вычисления диаметра частиц; 16) журнал (см. табл. II-9).

Для гранулометрического анализа пород применяют стеклянный ареометр обтекаемой формы, рассчитанный для плот-

Рис. II-6. Ареометр для измерения плотности суспензии.

I — луковца; *II* — стержень.

ности жидкости от 0,995 до 1,030 г/см³ (рис. II-6). Деления на стержне ареометра нанесены с точностью до 0,001. При гранулометрическом анализе пород отсчеты по ареометру берут упрощенные, так как единицу отбрасывают, а запятую переносят на три знака вправо. Например, вместо отсчета 1,0252 читают и записывают 25,2.

Ареометры на заводах градуируют по нижнему краю мениска. Так как суспензия из породы непрозрачная, то отсчеты во время анализа берут по верхнему краю мениска и учитывают поправку на его высоту (рис. II-7). Последнюю определяют один раз для каждого ареометра (перед началом работ) погружением его в дистиллированную воду при температуре градуировки ареометра, т. е. при 20 °С. Например, отсчет по нижнему краю мениска 0,9998, по верхнему 0,9994, высота мениска $0,9998 - 0,9994 = 0,0004$. Так как по ареометру берут упрощенный отсчет, то поправку на высоту мениска также умножают на 1000, следовательно, в приведенном примере она будет равна 0,4.

Кроме поправки на высоту мениска учитывают также поправку на температуру, если она при анализе больше или меньше 20 °С. Эту поправку определяют по табл. II-8 или по шкале температурных поправок на номограмме (см. рис. II-9).

Пример. Упрощенный отсчет по ареометру $R_0 = 25,2$. Поправка на высоту мениска $C = 0,4$. Поправка на температуру (17 °С) $t = -0,5$. Окончательный отсчет по ареометру $R = 25,2 + 0,4 + (-0,5) = 25,1$.

Последовательность определения

Общая схема гранулометрического анализа ареометрическим методом имеет следующий вид.

1. Образцы пород, особенно глинистых, для определения их гранулометрического состава этим методом должны доставляться в лабораторию в состоянии естественной влажности. Их очищают от упаковочного материала и затем приготавливают суспензию, как и для анализа пород пипеточным методом, в соответствии с указаниями, перечисленными в пунктах 1—6. Выполнив все эти указания, получают общее количество суспензии, равное 1 л. На этом заканчивают подготовку суспензии для анализа.

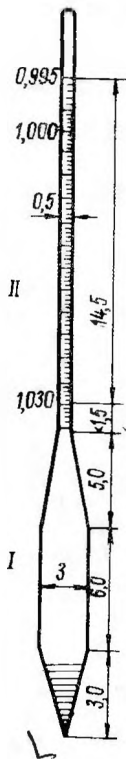
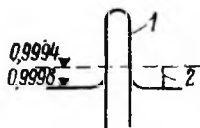


Рис. II-7. Определение высоты мениска при измерении плотности суспензии ареометром.
1 — стержень ареометра; 2 — высота мениска.



2. При подготовке суспензии из части породы, отделенной для анализа, берут навеску для определения ее влажности и пересчета массы пробы, взятой на анализ, на абсолютно-сухую массу. Кроме того, определяют процентное содержание в породе фракций крупнее 0,1 мм.

3. Приготовленную в цилиндре суспензию взбалтывают мешалкой до полного исчезновения осадка на дне. Когда этот момент будет зафиксирован, взбалтывание суспензии прекращают и замечают время, которое и будет временем начала анализа.

4. В суспензию осторожно опускают ареометр, при этом наблюдают, чтобы луковица его не прикасалась к стенкам цилиндра, и берут отсчеты по шкале ареометра через 30 с, 1 мин, 2 мин, 5 мин, 30 мин, 1 ч, 1,5 ч, 3 ч, 6 ч, 24 ч. Первые три отсчета (через 30 с, 1 мин, 2 мин) производят, не вынимая ареометра (рис. II-8). При последующих отсчетах ареометр вынимают из суспензии каждый раз, обмывают его и вытирают насухо. При этих отсчетах ареометр опускают в суспензию на 5—10 с до начала измерения, на глубину несколько большую, чем при предыдущем измерении.

Т а б л и ц а II-8. Температурные поправки к ареометру

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

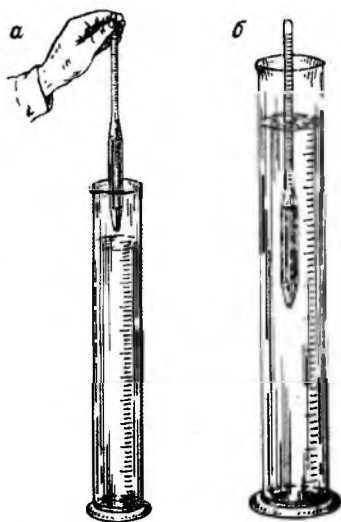


Рис. II-8. Измерение плотности суспензии ареометром.
 а — погружение ареометра; б — положение ареометра в момент измерения.

5. Результаты отсчетов по ареометру в виде упрощенных отсчетов записывают в журнал.

6. В процессе анализа производят измерения температуры суспензии (в центре цилиндра) с точностью до $0,5^{\circ}\text{C}$ один раз в течение первых пяти отсчетов, а далее при каждом измерении.

7. Производят первичную обработку записей, для того чтобы получить окончательные выражения отсчетов по ареометру R для каждого измерения. В каждый из упрощенных отсчетов R_0 вводят поправки на высоту мениска C и температуру t . Получив окончательные отсчеты по ареометру R , приступают к расчету диаметра и процентного содержания частиц. Диаметр частиц вычисляют по номограмме, которая должна быть приготовлена для каждого ареометра.

8. Номограмма для вычисления диаметра частиц при анализе пород с помощью ареометра показана на рис. II-9, где дан и ключ, поясняющий порядок пользования номограммой.

В основу построения номограммы положена зависимость, вытекающая из известной формулы Стокса

$$v = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_m - \rho_v}{\eta}$$

(см. гл. II, § 4), согласно которой диаметр частиц (мм), про-

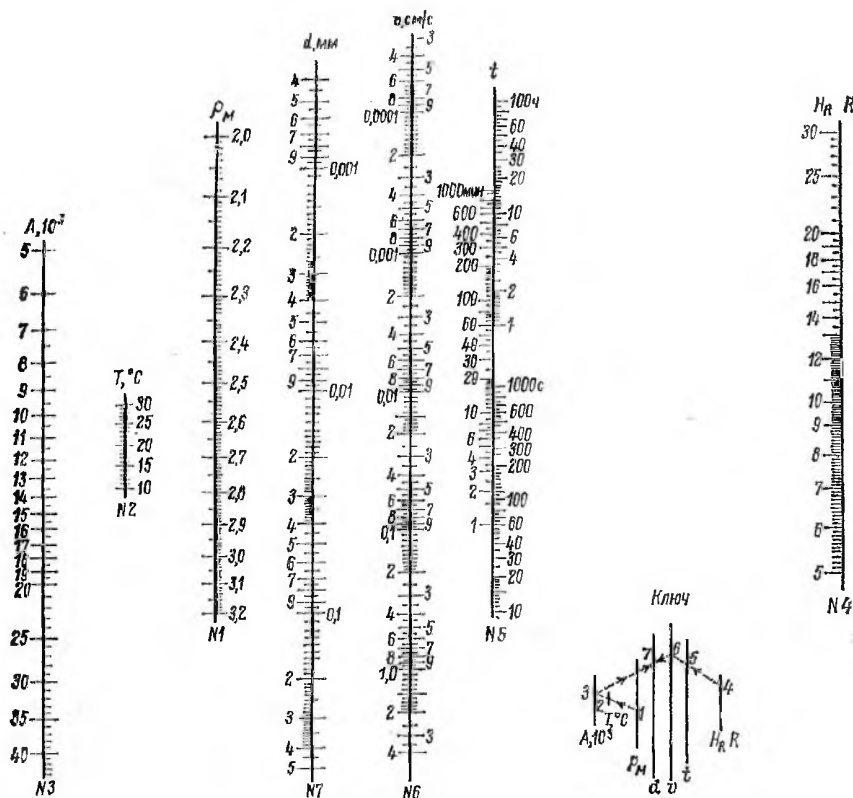


Рис. 11-9. Номограмма для вычисления диаметра частиц при граиулометрическом анализе пород ареометрическим методом.

шедших единицу пути в жидкости за определенное время, равен

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

где

$$A = \frac{\eta \cdot 1800}{g(\rho_m - \rho_v)}; \quad v = \frac{H}{t};$$

H — путь частиц, см; t — время падения частиц, с.

Величины, входящие в вышеприведенную формулу, показаны на следующих специальных шкалах номограммы: на шкале 1 — ρ_m — плотность минеральной части породы; на шкале 2 — T — температура суспензии, при которой производится анализ; на шкале 3 — $A \cdot 10^3$ — множитель A в подкоренном выра-

жении формулы Стокса, умноженный на 10^3 ; на шкале 7— d — диаметр частиц породы, мм; на шкале 6— v — скорость падения частиц в жидкости, см/с; на шкале 5— t — время отсчета по ареометру (с, мин и ч), прошедшее от начала анализа, т. е. от момента, когда зафиксировано полное упрочение осадка на дне цилиндра и прекращено взбалтывание суспензии; на шкале 4— R — окончательное выражение отсчета по ареометру при всех возможных погружениях его в жидкость, иначе говоря, шкала данного ареометра от 0,995 до 1,030, нанесенная на правую сторону шкалы 4.

Все шкалы на номограмме, за исключением шкалы 4, являются постоянными для любого ареометра. Так как сделать все ареометры совершенно одинаковыми невозможно, то одному и тому же отсчету по разным ареометрам при погружении их в жидкость будут соответствовать различные расстояния H_R от поверхности жидкости до центра водоизмещения ареометра. Поэтому правую сторону шкалы 4 номограммы — шкалу R — наносят в лаборатории для каждого ареометра отдельно при его тарировке (см. приложение 1). Значения H_R , показанные на левой стороне шкалы 4, необходимы лишь для тарировки ареометра; при выполнении анализа они не учитываются.

9. Порядок пользования номограммой для вычисления диаметра частиц следующий. Прикладывают линейку к шкалам 1 и 2 в точках, соответствующих плотности минеральной части породы ρ_m и температуре суспензии T при измерении, и на пересечении со шкалой 3 получают значение $A \cdot 10^3$. Прикладывают линейку к шкалам 4 и 5 в точках, соответствующих окончательному отсчету ареометра R и времени данного измерения; на пересечении линейки со шкалой 6 получают скорость падения частиц при данном измерении. Соединяя шкалы 3 и 6 в полученных точках, на пересечении линейки со шкалой 7 читают искомый диаметр частиц при данном измерении.

Пример. Плотность минеральной части породы $\rho_m = 2,63$ г/см³. Температура суспензии $T = 17^\circ\text{C}$. Время, прошедшее от начала анализа, $t = 2$ ч. Окончательный отсчет по ареометру $R = 2,1$.

Прикладываем линейку к шкале 1 в точке 2,63, к шкале 2 в точке 17°C , читаем на шкале 3 значение $A \cdot 10^3$, равное 12,3. Прикладываем линейку к шкале 4 в точке 2,1, к шкале 5 в точке 2 ч и читаем на шкале 6 значение, равное 0,0026 см/с. Соединяя точку 12,3 на шкале 3 и точку 0,0026 на шкале 6, на пересечении линейки со шкалой 7 читаем искомый диаметр частиц для данного измерения.

Подобным же образом получаем значение диаметра частиц и для других измерений и записываем их в журнал (табл. II-9).

Процентное содержание частиц вычисляют по формуле

$$x = \left(\frac{\rho_m}{\rho_m - 1} \cdot \frac{c}{b} \right) R,$$

Т а б л и ц а II-9. Журнал для определения гранулометрического состава пород ареометрическим методом

Лабораторный номер	Навеска B , г	Влажность породы, %	Масса абсолютно-сухой породы b , г	Плотность минеральной части породы ρ_M , г/см ³	Дата	Время суток	Время от начала анализа	Упрощенный отсчет по ареометру R_0	Упрощенный отсчет с поправкой на мениск $R_0 + C$	Температура суспензии, °C	Температурная поправка $\pm m$	Окончательный отсчет по ареометру R	Диаметр частиц, мм	Содержание фракций по совокупности начиная с самой мелкой, %	Диаметр частиц каждой фракции, мм	Содержание каждой фракции в породе, %
403	42	5	40	2,70	8/X 1981	11 ч 01 мин 30 с	30 с	23,5	23,8	18	-0,3	23,6	0,076	92,32	0,076—0,050	1,18
						11 02 00	1 мин	23,2	23,6	18	-0,3	23,3	0,050	91,14	0,050—0,034	0,45
						11 03 00	2 мин	22,8	23,2	18	-0,3	23,1	0,034	90,36	0,034—0,020	2,45
						11 06 00	5 мин	22,3	23,7	18	-0,3	23,4	0,020	87,61	0,020—0,013	1,96
						11 16 00	15 мин	21,8	22,2	18	-0,3	21,9	0,013	85,65	0,013—0,0073	5,88
						11 31 00	30 мин	20,3	20,7	18	-0,3	20,4	0,0073	79,77	0,0073—0,005	6,74
						12 01 00	1 ч	18,5	18,9	18,5	-0,3	18,6	0,005	73,03	0,005—0,004	9,78
						12 31 00	1 ч 30 мин	17,7	18,1	19	-0,2	17,9	0,004	70,25	0,004—0,0029	12,55
						14 01 00	3 ч	14,5	14,2	19	-0,2	14,7	0,0029	57,70	0,0029—0,0011	27,79
						17 01 00	6 ч	8,0	8,4	15	-0,8	7,4	0,0011	29,91	<0,0011	29,91

где x — процентное содержание частиц по совокупности, т. е. суммарное процентное содержание частиц размером меньше определенного диаметра d ; c — процентное содержание частиц диаметром более 0,5 мм, полученное в результате ситового анализа (если частиц диаметром более 0,5 мм в породе нет, то $c=100\%$); b — масса взятой навески породы, т. е. масса навески из частиц диаметром менее 0,5 мм в абсолютно-сухом состоянии; ρ_m — плотность минеральной части породы; R — окончательный отсчет по ареометру с поправками на мениск и температуру.

Пример 1. Содержание фракций диаметром более 0,5 мм в породе 20 %, а фракций менее 0,5 мм $c=80\%$. Навеска b равна 40 г. Плотность минеральной части породы ρ_m равна 2,63 г/см³. Окончательный отсчет по ареометру R равен 2,1. Подставляя значения в вышеприведенную формулу, имеем

$$x = \left(\frac{2,63}{263 - 1} \cdot \frac{80}{40} \right) \cdot 2,1 = 6,8 \%$$

Пример 2. Фракций диаметром более 0,5 мм порода не содержит, следовательно, $c=100\%$. Навеска b равна 40 г. Плотность минеральной части породы и окончательный отсчет по ареометру соответственно равны 2,63 и 2,1. Подставляя значения в формулу, имеем

$$x = \left(\frac{2,63}{2,63 - 1} \cdot \frac{100}{40} \right) \cdot 2,1 = 8,4 \%$$

Из приведенной формулы и примеров видно, что множитель $[\rho_m/(\rho_m-1)](c/b)R$ для каждого анализа есть величина постоянная, поэтому вычисление процентного содержания различных фракций в породе не представляет большого труда. Однако при вычислении процентного содержания фракций по приведенной формуле определяется не содержание отдельных фракций, а сумма фракций определенного диаметра, т. е. получают процентное содержание фракций по совокупности начиная с самой мелкой.

Порядок вычисления процентного содержания отдельных фракций приведен в табл. II-9.

10. При ареометрическом методе анализа пород диаметры частиц определяются не общепринятыс. Этот метод отличается от других тем, что после того, как высчитано процентное содержание фракций по совокупности начиная с самой мелкой, требуется обязательное графическое изображение результатов анализа в виде кривой гранулометрического состава. Имея такую кривую, можно выразить результаты анализа в обычном виде, т. е. в виде таблицы процентного содержания частиц по общепринятым фракциям (см. табл. II-2).

Графические способы изображения гранулометрического состава пород

Результаты гранулометрических анализов обычно представляют в виде таблиц, в которых показывают процентное содержание в породе различных фракций. Так как таблицы не дают наглядного представления о составе пород, то в инженерно-геологической практике принято результаты анализов изображать также в виде различных графиков. Наиболее употребительными способами графического изображения состава пород являются диаграммы, треугольники и кривые однородности. Диаграммы гранулометрического состава породы показаны на рис. II-10. На каждой из них приведены результаты одного анализа. Для изображения результатов массовых анализов этот способ

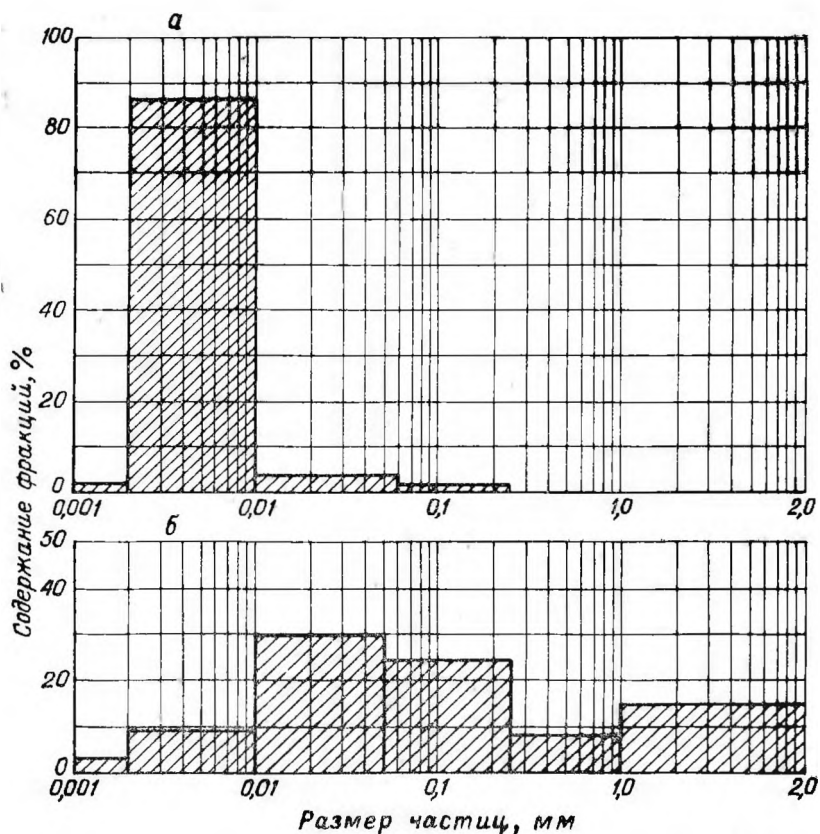


Рис. II-10. Диаграммы гранулометрического состава глинистых пород.
Породы: а — однородная, б — неоднородная.

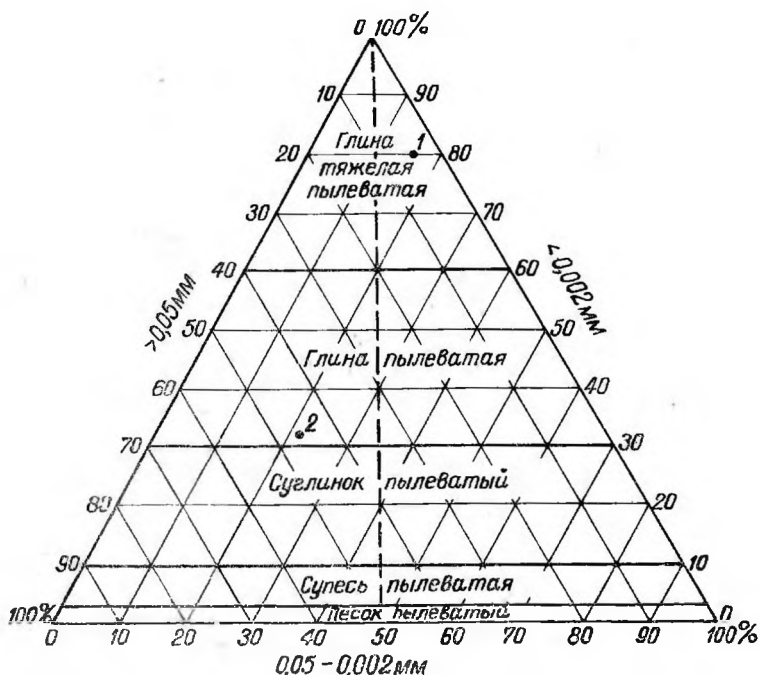


Рис. II-11. Треугольная диаграмма для изображения гранулометрического состава глинистых пород.

неудобен. Диаграммами целесообразно пользоваться только для наглядного показа состава типичных разностей пород, например, на строительной площадке, по трассе проектируемой дороги и др.

Для изображения результатов гранулометрического состава применяют также равносторонние треугольники (рис. II-11—II-13). Известно, что если из какой-либо точки внутри равностороннего треугольника опустить перпендикуляры на его стороны, то сумма перпендикуляров будет равна высоте треугольника. Высоты в равностороннем треугольнике все равны. Поэтому, если каждую высоту треугольника разделить на 100 равных частей и провести через них параллельные линии, перпендикулярные к высоте, то и стороны треугольника разделятся на 100 частей. Показывая на каждой стороне такого треугольника содержание трех основных фракций (для глинистых пород — глинистых, пылеватых и песчаных, а для песчаных — грубо- и крупнозернистых, среднезернистых и мелко- и тонкозернистых), можно точками в треугольнике изобразить состав породы.

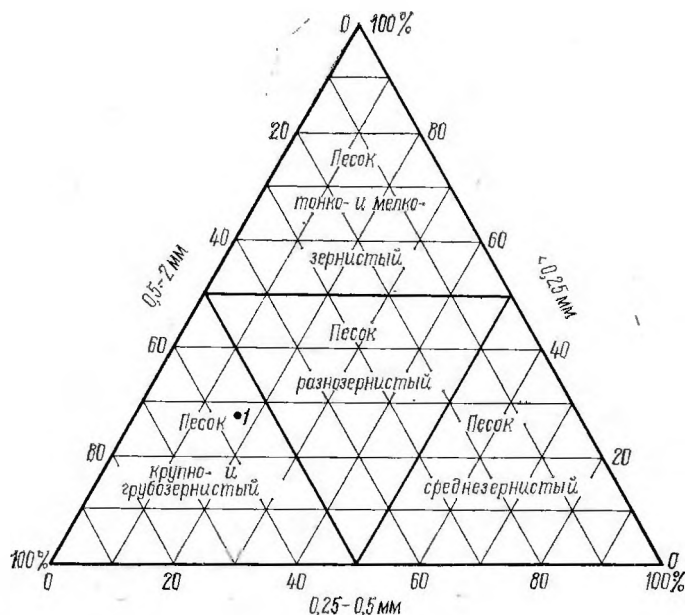


Рис. II-12. Треугольная диаграмма для изображения гранулометрического состава песчаных пород.

Например, на рис. II-11 точка 1 показывает, что в породе содержится песчаных фракций 5 %, пылеватых 15 % и глинистых 80 %. Точка 2 показывает соответственно 46; 22 и 32 %. На рис. II-12 точка 1 показывает, что в песке содержится грубо- и крупнозернистых фракций 56 %, среднезернистых 18 % и мелко- и тонкозернистых 26 %.

Таким образом на треугольнике можно изобразить результаты многих анализов, причем в зависимости от степени однородности состава породы точки в треугольнике будут располагаться различно. Если порода однородна по своему составу, точки будут концентрироваться в определенных местах, если порода неоднородна — точки в треугольнике будут разбросаны.

На рис. II-11 можно видеть, что точки, изображающие состав глин, будут концентрироваться в верхней половине треугольника. Точки, изображающие состав сулинков, супесей и песков, расположатся соответственно в пределах нижней половины треугольника. При этом точки пылеватых пород будут концентрироваться в правой половине треугольника, а непылеватых — в левой. На рис. II-12 видно, что точки, изображающие состав тонко- и мелкозернистых песков, будут концентрироваться в верхнем углу треугольника, грубо- и крупнозерни-

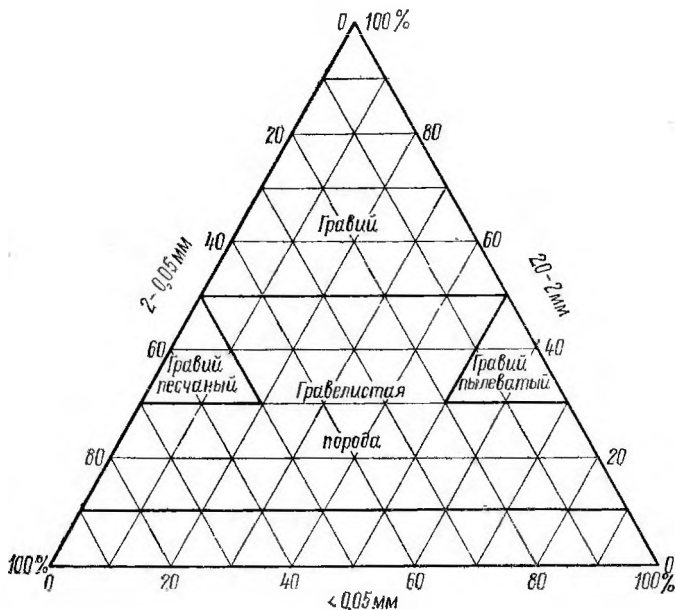


Рис. II-13. Треугольная диаграмма для изображения гранулометрического состава гравелистых пород.

стых — в нижнем левом и среднезернистых — в нижнем правом углах. Точки, изображающие состав разномерных песков, будут располагаться в центре треугольника. На рис. II-13 показан аналогичный треугольник для классификации гравелистых пород по гранулометрическому составу и для изображения результатов их анализов.

Весьма распространенным способом графического изображения состава пород являются интегральные кривые однородности. Строят их в прямоугольной системе координат в простом или полупрологарифмическом масштабе.

При построении интегральной кривой в простом масштабе (рис. II-14) на оси абсцисс откладывают размеры частиц в миллиметрах, а на оси ординат — процентное содержание фракций. Для построения кривой однородности результаты анализов пересчитывают по совокупности фракций. Для этого, начиная с самой мелкой фракции, проценты суммируют до 100. Каждая из промежуточных цифр полученного ряда будет показывать суммарное процентное содержание в породе фракций меньше определенного диаметра. Пересчет результатов анализа по совокупности фракций приведен в табл. II-9.

Выполнив пересчет, приступают к построению кривой. Для этого на оси абсцисс находят диаметры частиц начиная с самых мелких, а на соответствующих ординатах точками отме-

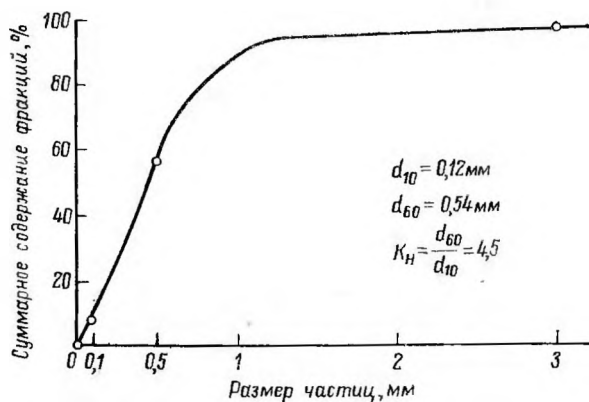


Рис. II-14. Интегральная кривая гранулометрического состава глинистой породы в простом масштабе.

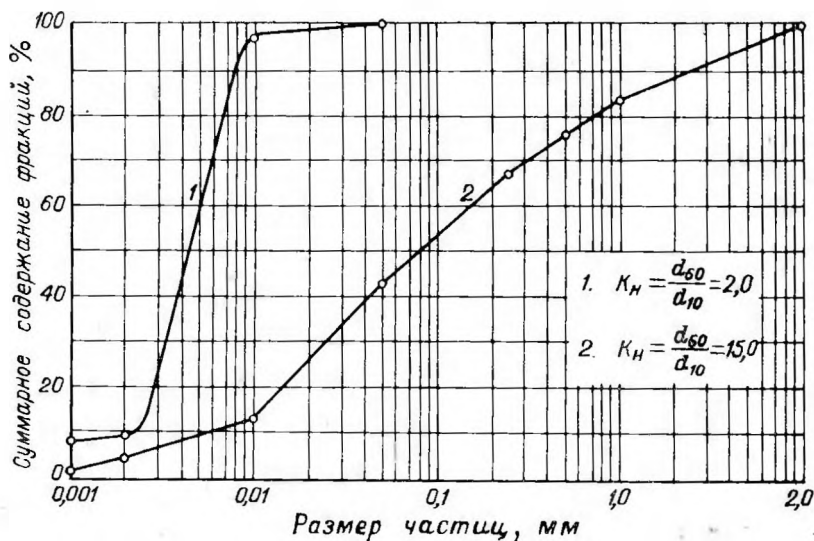


Рис. II-15. Интегральные кривые гранулометрического состава глинистых пород в полулогарифмическом масштабе.

Породы: 1 — однородная, 2 — неоднородная.

чают процентное содержание фракций меньше определенного диаметра. Затем все точки соединяют плавной кривой, изображающей состав породы.

При построении интегральной кривой однородности в полулогарифмическом масштабе (рис. II-15) по оси ординат, как и

в первом случае, показывают процентное содержание фракций по совокупности. По оси абсцисс показывают не диаметр частиц в миллиметрах, а логарифмы этих величин или, точнее, размеры, пропорциональные логарифмам. Поэтому для построения шкалы по оси абсцисс необходимо выбрать основание этой шкалы, т. е. длину отрезка, соответствующего $\lg 10$. Для построения кривых однородности может быть рекомендован отрезок длиной 4 см. Если за основание шкалы принять отрезок длиной 4 см, то по оси абсцисс от начала координат через интервал 4 см делают граничные метки. В начале координат ставят число 0,001, а против каждой последующей метки соответственно 0,01; 0,1; 1; 10 и т. д. Если в составе породы тонкие фракции отсутствуют, то в начале координат ставят не 0,001, а 0,01 или 0,1, т. е. шкала может быть сдвинута влево.

Если $\lg 10 = 1$ будет соответствовать длине 4 см, то логарифмы предыдущих чисел будут равны следующим длинам:

$\lg 2 = 0,301$,	$0,301 \times 4 = 1,2$ см;
$\lg 3 = 0,477$,	$0,477 \times 4 = 1,9$ см;
$\lg 4 = 0,602$,	$0,602 \times 4 = 2,4$ см;
$\lg 5 = 0,699$,	$0,699 \times 4 = 2,8$ см;
$\lg 6 = 0,778$,	$0,778 \times 4 = 3,1$ см;
$\lg 7 = 0,845$,	$0,845 \times 4 = 3,4$ см;
$\lg 8 = 0,903$,	$0,903 \times 4 = 3,6$ см;
$\lg 9 = 0,954$,	$0,954 \times 4 = 3,8$ см.

Откладывая длину вычисленных отрезков от начала координат и от каждой граничной метки вправо, на шкале абсцисс делают промежуточные метки, против которых ставят соответствующие числа: в первом интервале 0,002; 0,003; 0,004 и т. д., во втором интервале 0,02; 0,03; 0,04 и т. д., в третьем интервале 0,2; 0,3; 0,4 и т. д.

Далее пересчитывают фракции по совокупности, на соответствующих ординатах точками отмечают процентное содержание фракций меньше определенного диаметра, точки соединяют плавной линией и получают кривую однородности в полул로그арифмическом масштабе.

Такие кривые получаются менее растянутыми по оси абсцисс, чем кривые, построенные в простом масштабе; они более удобны и наглядны. Характер кривых показывает степень однородности частиц, слагающих породу. Так, например, если кривая крутая, то порода однородная, если кривая пологая, то порода неоднородная. Мерой неоднородности гранулометрического состава песчаных и глинистых пород может служить коэффициент неоднородности

$$K_{\Pi} = d_{60}/d_{10},$$

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

Под действующим, или эффективным, обычно понимают такой диаметр частиц, меньше которого в породе содержится 10 % от всех частиц. Этот диаметр определяют по интегральной кривой гранулометрического состава породы (см. рис. II-15). Эта условная величина предложена с целью приравнять водопроницаемость неоднородной по составу породы к водопроницаемости некоторой однородной породы. Ранее действующим диаметром частиц пользовались при определении коэффициента фильтрации песчаных пород по эмпирическим формулам.

Контролирующим диаметром частиц называют такой, меньше которого в данной породе содержится 60 % частиц. Этот диаметр определяют также по интегральной кривой гранулометрического состава. При коэффициенте неоднородности песчаных пород больше 3, а глинистых больше 5 они считаются неоднородными.

По интегральной кривой однородности можно определить процентное содержание в породе фракций любого диаметра. Для этого к оси абсцисс необходимо восстановить перпендикуляры из точек, ограничивающих размер фракции, до пересечения с кривой; из точек пересечения перпендикуляров с кривой

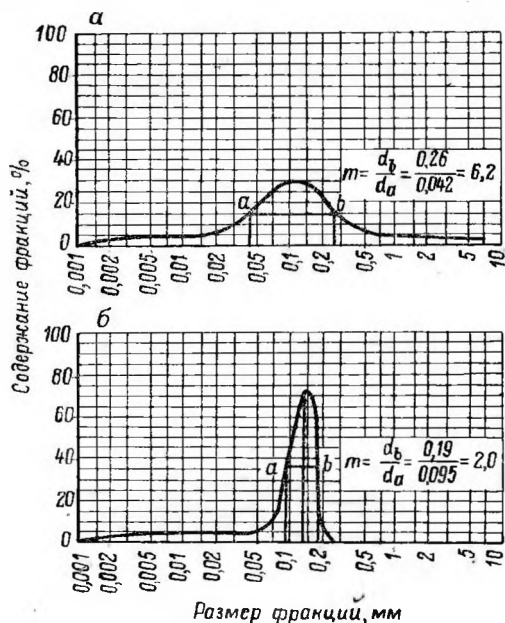


Рис. II-16. Кривые, изображающие гранулометрический состав пород по способу Свирьстроя.

Породы: а — неоднородная, б — однородная.

провести две горизонтальные параллельные линии до оси ординат и подсчитать процентное содержание в породе интересующей фракции. Точно так же по кривой однородности можно найти диаметр частиц, соответствующий определенному процентному содержанию фракций. Для этого проводят горизонтальную линию от оси ординат до пересечения ее с кривой, из точки пересечения опускают перпендикуляр на ось абсцисс, где читают размер диаметра.

Весьма наглядные кривые однородности получаются при построении их по способу Свирьстроя (рис. II-16). В этом случае пересчет процентного содержания фракций по совокупности производить не нужно. Процентное содержание каждой фракции отмечают точками на ординатах, восстанавливаемых к оси абсцисс от среднего диаметра каждой фракции. Найденные таким образом точки соединяют плавной кривой. Такая кривая наглядно характеризует степень однородности породы: чем выше и тоньше пик кривой, тем однороднее порода.

Мерой однородности породы в этом случае может служить модуль неоднородности. Определяют его следующим образом. На половине высоты пика проводят прямую ab , затем устанавливают диаметры частиц, соответствующие точкам пересечения a и b . Отношение большего диаметра к меньшему и принято называть модулем неоднородности, т. е.

$$m_n = d_b/d_a.$$

§ 5. ИЗУЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Иммерсионный метод

При изучении минерального состава определенных фракций песчаных и глинистых пород широко используют иммерсионный метод. При этом методе зерна минералов и их агрегаты, погруженные в иммерсионные жидкости, исследуют под микроскопом. Для применения этого метода кроме поляризационного микроскопа требуется набор жидкостей с известными показателями преломления. В такой набор входят обычно до 100 жидкостей с показателями преломления от 1,40 до 1,79. При диагностике минерала подбирают такие две соседние жидкости, из которых одна имела бы показатель преломления больше, а другая — меньше, чем у исследуемого минерала. После определения минерального состава зерен производят подсчет содержания тех или иных минералов в исследуемой фракции породы. Для получения объективных данных желательно, чтобы из каждой исследуемой фракции для подсчета и вычисления процентного содержания минералов исследовалось до 250—300 зерен.

Исследовать отдельные частицы глинистых минералов в силу их малого размера трудно. Поэтому для ориентировочного определения минерального состава тонкодисперсной части глинистых пород можно исследовать агрегаты глинистых частиц. В этом случае можно рекомендовать изучение пород специально приготовленным препаратам [Викулова М. Ф., 1952, 1957 г.]. Этот метод основан на том, что при высушивании глинистой суспензии частички глины слипаются не по произвольным направлениям, а закономерно, с примерно одинаковой ориентировкой длинных осей, что обуславливает сходную оптическую ориентировку частиц и позволяет измерять оптические константы агрегатов в иммерсионных жидкостях.

Для приготовления препаратов из суспензии глинистой породы после ее отстаивания отбирают пробу, содержащую глинистые частицы, которую затем выпаривают в фарфоровой чашке сначала на водяной бане, а затем на воздухе или в термостате при 35 °С. Высушенная глинистая масса покрывает дно чашки тонкой хрупкой корочкой, с поверхности которой лезвием бритвы срезают тонкую мелкую стружку и наносят ее сразу на несколько (6—8) предметных стекол, так как для каждой иммерсионной жидкости надо брать новый препарат. Препараты просматривают под микроскопом, определяют форму, размеры агрегатов и показатели преломления. Это позволяет судить о преобладающем глинистом минерале в тонкой фракции породы и таким образом ориентировочно устанавливать ее минеральный тип.

Гидрослюдистые глины в препаратах дают удлиненные агрегаты щепковидной или веретенновидной формы. Показатели преломления их изменяются от 1,555 до 1,600, двупреломление — от 0,018 до 0,030. Каолинитовые глины образуют агрегаты изометричной или удлиненной формы с извилистыми краями. Показатели преломления их находятся в пределах 1,561—1,570, двупреломление — 0,005—0,009. Монтмориллонитовые глины образуют агрегаты характерной спиралевидной, веерообразной или серповидной формы с показателями преломления 1,480—1,510 и двупреломлением 0,018—0,030.

Иммерсионный метод позволяет определять минеральный состав отдельных фракций, слагающих песчаные породы, и устанавливать наличие в их составе неустойчивых (реакционноспособных) минералов. Этот метод позволяет определять (хотя и ориентировочно) минеральный тип глинистых пород. Метод несложен, и при отсутствии в лаборатории электронного микроскопа, рентгеновской и термической установок должен обязательно применяться наряду с методом окрашивания и изучения пород в шлифах.

Метод окрашивания

Метод определения минерального типа глинистых пород с помощью органических красителей разработан Н. Е. Веденевой, М. Ф. Викуловой [1952 г.] и М. А. Ратеевым [1952 г.]. Он основан на способности глинистых частиц разного кристаллического строения различно окрашиваться органическими красителями.

Метод окрашивания прост, не требует сложной аппаратуры, дорогих реактивов, высокой квалификации исполнителей и вполне применим при инженерно-геологическом изучении глинистых пород как в стационарных, так и в полевых лабораториях. Окрашиванию подвергают породы глинистые, а также песчано-глинистые, карбонатно-глинистые и другие, преимущественно светлоокрашенные: белые, серые с разными оттенками (желтоватые, зеленоватые и др.), зеленые, синие. Окрашивание темно-серых и черных глин, богатых органическим веществом, а также красно-бурых, содержащих окислы железа, можно производить только после удаления из них примесей (см. ниже).

Для выполнения работ по окрашиванию необходимо иметь следующую посуду и реактивы: 1) пробирки и штативы для них; 2) колбы вместимостью 0,5 и 1 л; 3) бюретки вместимостью 1 и 5 мл; 4) фарфоровые чашки; 5) органические красители в порошках (метиленовый голубой, бензидин и хризоидин); 6) хлористый калий; 7) соляную кислоту 5 %-ную и 10 %-ную; 8) силикагель мелкий крупнопористый (МСК).

Приготавливают водные растворы красителей следующих концентраций.

1. Метиленовый голубой (МГ)—0,001 %-ный (10 мг сухого МГ растворяют в 1 л дистиллированной или кипяченой воды).

2. Бензидин (БН)—0,5 г сухого БН всыпают в склянку вместимостью 500 см³, которую наполняют водой. Изредка взбалтывая, дают раствору постоять 2—3 ч, после чего его отфильтровывают и полученный раствор разбавляют вдвое.

3. Хризоидин—0,0001 %-ный раствор (1 мг сухого порошка растворяют в 1 л воды).

4. Хлористый калий (KCl)—насыщенный раствор.

Все красители необходимо хранить в темном месте.

Окрашивание метиленовым голубым производится следующим образом (по М. Ф. Викуловой).

1. Кусочек породы массой 0,5—1 г замачивают водой, растирают, переводят в пробирку и заливают водой. Песчано-глинистые породы берут в несколько большем количестве и в пробирку наливают меньше воды, чтобы получить достаточно плотную суспензию. Последнюю взбалтывают и оставляют в пробирке на сутки.

2. Через сутки, если суспензия не скоагулировала, верхние 7 см ее сливают в чистую пробирку. Если суспензия очень густая, ее разбавляют водой. Внешне она должна иметь вид слегка мутной воды.

3. Если суспензия через сутки осела (скоагулировала) и над осадком получился слой чистой воды, его сливают, пробирку вновь доливают водой, взбалтывают и оставляют на сутки. Так поступают до тех пор, пока суспензия не станет устойчивой. Если породы сильно засолены, их предварительно перед окрашиванием необходимо промыть водой, а в случае присутствия карбонатов — 2 %-ной соляной кислотой при комнатной температуре в течение 24 ч с последующей отмывкой хлора.

4. В чистую пробирку наливают 5 мл приготовленной суспензии, добавляют в нее такое же количество МГ и взбалтывают, затем половину этой суспензии отливают в другую пробирку и в нее добавляют 2 капли насыщенного раствора КСl. Обе пробирки (одна с МГ, другая с МГ + КСl) взбалтывают. Через сутки производят наблюдение.

5. При наблюдении отмечают цвет раствора в обеих пробирках и его прозрачность, характер осадка в обеих пробирках (гелевидный, плотный, с гелевидным налетом и т. д.), его цвет и устанавливают, полностью ли окрашен осадок или только его верхняя часть. Затем обе пробирки взбалтывают и наблюдают характер окрашивания всей суспензии в целом.

6. Если в пробирке с МГ суспензия осела полностью, раствор над осадком стал прозрачным, бесцветным, а осадок окрашен, то сливают бесцветный раствор и добавляют такое же количество МГ (5 мл). Это явление наблюдается в некоторых гидрослюдистых глинах и полностью еще не объяснено. Иногда приходится добавлять краситель несколько раз.

7. Если в пробирке с МГ часть суспензии не осела и окрашена, то определяют ее цвет. Затем взбалтывают пробирку и наблюдают цвет всей суспензии. Если он не изменяется, значит, наиболее дисперсная часть содержит тот же минерал, что и осадок в целом. Если цвет изменился, следовательно, тонкодисперсная и более грубодисперсная (в осадке) части суспензии различны по составу.

8. Цвет окрашенной суспензии определяют визуально на белом фоне при дневном свете по специально изготовленной 10-балльной шкале (рис. II-17). Необходимо отмечать также и оттенки, которые могут быть обусловлены примесями других глинистых минералов, а также неглинистых минералов или растворимых соединений. Важно обращать внимание на яркость и чистоту цвета окрашенных суспензий.

9. Каолинитовые глины окрашиваются МГ в блеклый светло-фиолетовый цвет, который не меняется от добавки КСl.

Рис. II-17. Цветная шкала, применяемая при определении минерального типа глинистых пород с помощью органических красителей.

Примесь гидрослюда вызывает изменение окраски от добавки КСІ в фиолетово-синий, синий или голубой цвет (в зависимости от увеличения количества гидрослюда). Осадок плотный.

10. Гидрослюдистые глины окрашиваются в фиолетово-синие и синие цвета, мало изменяющиеся от добавки КСІ, или ведут себя так же, как и каолинитовые глины, и тогда их можно отличить от каолинита с помощью окрашивания бензидином (см. ниже). Осадок плотный.

11. Монтмориллонитовые глины дают с МГ интенсивный чистый фиолетовый, фиолетово-синий или синий цвет, который от КСІ становится ярко-голубым, голубовато-зеленым или зеленовато-голубым. Осадок гелевидный.

12. Более точные результаты окрашивания получают при измерении спектра поглощения с помощью спектрофотометра. Описание этого прибора и методика работы с ним освещены в методических руководствах по петрографии осадочных пород [Викулова М. Ф., 1952 г.; Страхов Н. М., 1957 г.].

Спектральные кривые поглощения МГ глинистой суспензией каолинитовых глин имеют резко выраженные максимумы адсорбции в области длин волн 560—580 нм; добавка к суспензии КСІ не меняет спектральной кривой. Спектральные кривые поглощения МГ для гидрослюдистых глин имеют два максимума поглощения: более развитый в области 580 нм и второй, более слабый, в интервале 640—670 нм. Последний максимум может несколько усиливаться при добавке КСІ. Спектры поглощения МГ для Са-монтмориллонитовых глин имеют максимум в области 560—589 нм, резко сдвигающийся после добавления КСІ в область длин волн 660—670 нм.

13. Для уточнения диагностики гидрослюдов производят окрашивание суспензии бензидином. Для этого берут в пробирку 2 мл суспензии, приготовленной из исследуемого образца породы, и добавляют к ней такое же количество бензидина. Пробирку взбалтывают. Наблюдения производят через сутки.

Гидрослюды слабо окрашиваются бензидином в грязновато-синий и серо-синий цвет. Иногда эта окраска не улавливается глазом и может быть установлена только с помощью спектрофотометра. Каолинитовые глины бензидином не окрашиваются.

I	Фиолетовый (ф)
II	Фиолетово-синий (ф-с)
III	Синий (с)
IV	Сине-голубой (с-г)
V	Голубой (г)
VI	Голубовато-зеленый (г-з)
VII	Зеленый (з)
VIII	Грязно-зеленый - зеленый (гр-з)
IX	Грязно-зеленый (гр)
X	Желто-зеленый (ж-з)

Но иногда наблюдается незначительная их окраска, обусловленная примесью других глинистых минералов. Монтмориллонитовые глины окрашиваются бензидином в глубокий синий цвет.

14. При использовании хризоидина берут две пробирки и в каждую наливают по 1 мл приготовленной суспензии. В них же добавляют по 1 мл раствора хризоидина. В одну из пробирок приливают 1—2 капли 5 %-ной KCl, чтобы ускорить оседание осадка из суспензии. Суспензии из монтмориллонитовых глин окрашиваются хризоидином в кирпично-красный цвет, который может быть ярко-красным при добавлении красителя. Добавка одной капли раствора HCl вызывает коагуляцию, и раствор становится бесцветным. Окраска осадка при этом остается неизменной. Суспензии каолинитовой и гидрослюдистой глин окрашиваются хризоидином в светло-желтый («канареечный») цвет. При оседании осадка из суспензии видно, что часть красителя остается в растворе. Если, слив раствор, заменить его чистой водой, то бледная желтая окраска осадка еще более побледнеет, так как часть красителя десорбируется. Повторным промыванием можно почти нацело отмыть глину от хризоидина, чего невозможно добиться при окрашивании монтмориллонитовых глин.

15. Для установления примеси каолинита в любой глинистой породе применяется силикагель (искусственный гель кремнезема). Для этого в пробирку с суспензией, окрашенной МГ, опускают несколько зерен силикагеля и оставляют ее на сутки. Если на следующий день силикагель окрасится МГ в синий цвет, это укажет на присутствие каолинита.

16. Из всех перечисленных красителей наиболее широко используется метиленовый голубой (основной краситель), который способен менять окраску в широком диапазоне — от фиолетовых до желто-зеленых тонов. Другие красители — хризоидин и бензидин — применяют для уточнения результатов окрашивания.

17. Результаты окрашивания изображают графически в виде двух кривых (рис. II-18): одна (сплошная) — для показаний МГ, другая (штриховая) — для МГ с добавкой KCl. Совпадение обеих кривых характерно для гидрослюд и каолинита. Слабое расхождение кривых позволяет предполагать наличие смеси двух каких-либо глинистых минералов или частиц одного минерала, но разной степени изменения. Сильное расхождение указывает на наличие монтмориллонита.

18. Анализ разрезов в полевых условиях с применением метода окрашивания позволяет рационально отбирать минимальное количество образцов для детальных лабораторных исследований. Зная состав преобладающего глинистого минерала в глинистых породах, можно приближенно судить об их фи-

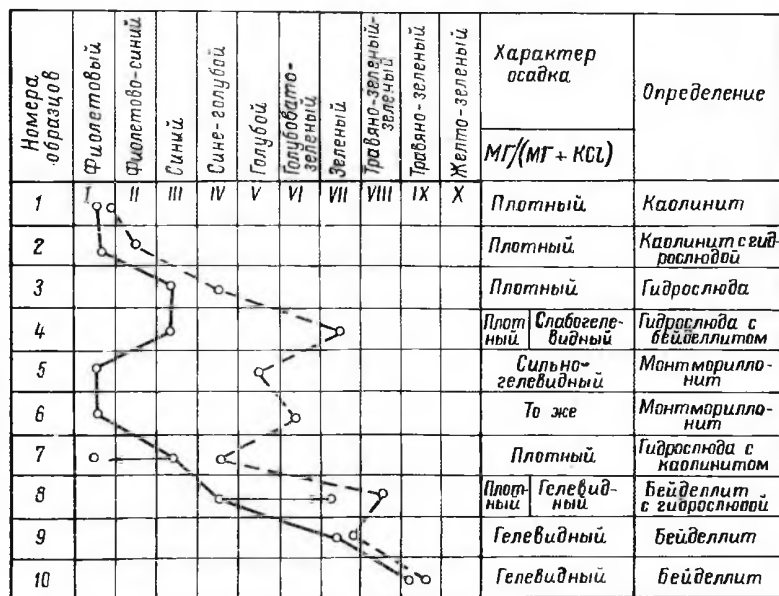


Рис. II-18. График для диагностики глинистых минералов при их окрашивании метиленовым голубым красителем (МГ).

зико-механических свойствах. Сопоставляя кривые окрашивания с данными макроскопического изучения разреза, можно более уверенно расчленить его на петрографические комплексы и выделить типы пород.

19. Для удаления свободных окислов (оксидов) железа, окрашивающих глинистые породы в бурые, красновато-бурые и желтые тона различной интенсивности, Т. С. Берлин [1955 г.] предложила следующий метод. Каолинитовые и монтмориллонитовые глины обрабатывают 3 %-ным раствором щавелевой кислоты в присутствии металлического алюминия при температуре 40 и 80 °С в течение 20, 40, 60 мин в зависимости от содержания Fe_2O_3 . Для гидрослюдистых глин такую обработку следует проводить при температуре 40 °С в течение 1 ч.

20. Органическое вещество из глин может быть удалено раствором перекиси водорода различной концентрации (от 6 до 16 %) при температуре 24, 40, 70 °С в течение 90 мин.

В практике петрографических исследований глинистых минералов используется адсорбционный люминесцентный анализ с применением органических красителей-люминофоров, предложенный М. В. Эйриш [1966 г.]. Этот метод диагностики глинистых минералов основан на том, что многие красители-люмино-

форы способны взаимодействовать с глинистыми минералами путем сорбции молекул и ионов красителя на поверхности глинистых частиц. При этом проявляется действие всех основных видов сорбционных связей глинистых минералов. При образовании того или иного вида сорбционных связей у комплекса глинистый минерал — краситель наблюдаются довольно специфические изменения спектров люминесцентного свечения. Этим обеспечивается возможность изучения сорбционных связей и свойств исследуемых глин. Поскольку отдельные виды указанных сорбционных связей преобладают у определенных минералов или групп минералов, по спектрам люминесцентного свечения можно делать вывод о минеральном составе глин.

Из многих красителей-алюминофоров для окрашивания глинистых суспензий применяют три: родамин 6Ж, корифосфин и аурамин. Причем глинистые суспензии, окрашенные родамином 6Ж, могут исследоваться на солнечном свете без люминесцентного осветителя. Методика определений изложена в указанной работе М. В. Эйриш.

Термический анализ

Этот анализ основан на том, что большинство минералов при нагревании испытывает те или иные физические или химические превращения, сопровождающиеся поглощением или выделением тепла. Качественная характеристика этих процессов может быть получена с помощью автоматической записи дифференциальных кривых нагревания вещества.

Сущность методики получения дифференциальных кривых нагревания заключается в том, что испытываемое вещество (растертая в порошок порода, минерал или выделенная из породы фракция) и одновременно термоинертное вещество-эталон, не испытывающий при нагревании никаких превращений (Al_2O_3 или MgO), помещают в тиглях в печь и нагревают равномерно и непрерывно до 1000—1200 °С. Для определения разности температур между образцом и эталоном служит дифференциальная термопара, которая представляет собой как бы две обычные термопары (определитель температуры), помещенные непосредственно в центры испытываемого вещества и эталона. Термоэлектроды этих термопар идут навстречу друг другу через зеркальный гальванометр.

Если исследуемый образец не испытывает при нагревании никаких физико-химических превращений, как и эталон, тока в цепи не возникает, так как оба спая термопар нагреваются одинаково и возникающие в них термоэлектродные ЭДС гасят друг друга. При этом самописец пишет прямую линию практически параллельно оси абсцисс. При возникновении в испытываемом веществе тепловой реакции (поглощение или выделение тепла) воз-

никает разность температур между ним и эталоном, в цепи появляется ток и самописец регистрирует на фотобумаге дифференциальную кривую.

На кривых нагревания по оси ординат записывается разность между температурами исследуемого образца и эталона, а по оси абсцисс — время и температура через каждые 100 °С. Таким образом, вся кривая дает характеристику теплового процесса, происходящего в исследуемом веществе при нагревании, во времени.

Реакции, сопровождающиеся выделением тепла, фиксируются на кривых нагревания в виде пиков, обращенных вверх (экзотермический эффект); процессы, протекающие с поглощением тепла, — в виде пиков, обращенных вниз (эндотермический эффект). Началом любой реакции считается начало отклонения кривой от прямой горизонтальной линии. Максимальные точки отклонения (остановки) свидетельствуют о конце реакции.

Каждый класс минералов имеет свою общую групповую характеристику. Каждый минерал этого класса характеризуется индивидуальными экзотермическими и эндотермическими эффектами. Зная термические характеристики отдельных минералов, можно определить минеральный состав исследуемых пород. Для этого кривую нагревания исследуемой породы или минерала сравнивают с эталонными кривыми нагревания чистых минералов и их смесей.

Для класса водных силикатов, к которому относятся все глинистые минералы, характерен один общий процесс — дегидратация, сопровождающийся интенсивными эндотермическими эффектами, но для каждого минерала этого класса температура, при которой протекает та или иная эндотермическая реакция, различна. Это видно из кривых нагревания глин (рис. II-19—II-21).

М. Ф. Викулова [1957 г.] на основании изучения многочисленных кривых нагревания глинистых минералов пришла к заключению, что наиболее четкие отличия имеют следующие минералы: аллофан, каолинит, диксит, накрит, монтмориллонит, глиноземистый, волконскоит — и сравнительно чистые типы глин: каолинитовые, глиноземисто-монтмориллонитовые и гидрослюдистые. Другие минералы и типы глин, имеющие сходный характер кривых нагревания, для диагностики требуют дополнительных анализов другими методами.

Таким образом, кривые нагревания позволяют четко диагностировать наиболее широко распространенные глинистые минералы, определять минеральный тип глинистой породы, что весьма важно знать для инженерно-геологической характеристики и оценки глинистых пород. Поэтому при инженерно-геологических исследованиях следует производить термический

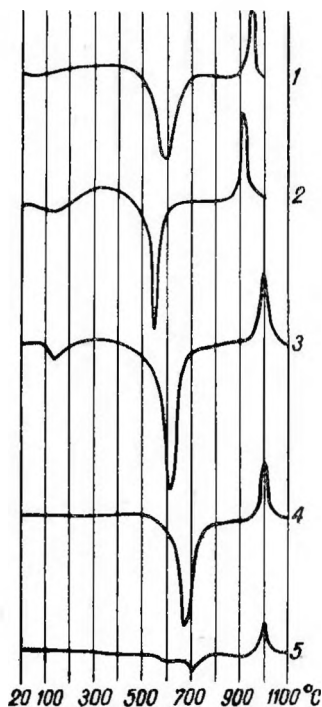


Рис. 11-19. Дифференциальные кривые нагревания минералов группы каолинита. 1 — каолинит крупнокристаллический; 2 — каолинит тонкодисперсный; 3 — галлузит; 4 — дикцит; 5 — нактит.

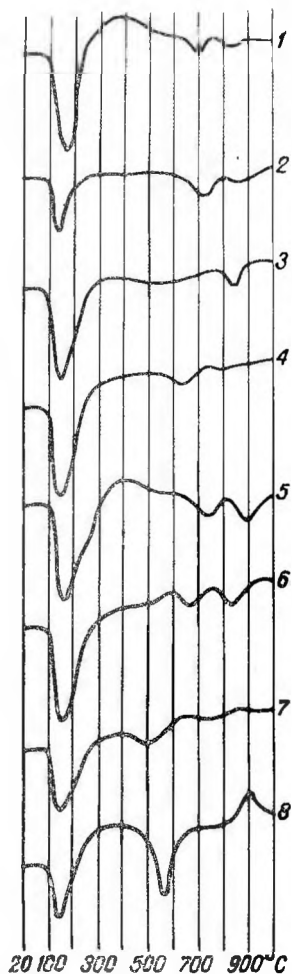


Рис. 11-20. Дифференциальные кривые нагревания минералов группы монтмориллонита.

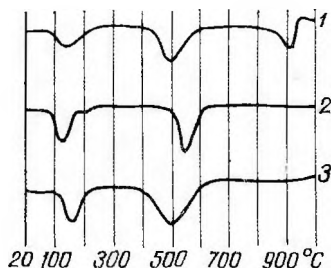
1 — монтмориллонит асканский; 2 — бентонит огландинский; 3 — монтмориллонит из Гумбри; 4 — монтмориллонит; 5 — бенитонит пыжевский; 6 — монтмориллонит «Гилляби»; 7 — монтропит; 8 — бейделлит.

анализ природных образцов, а затем выделенной из них глинистой фракции.

Как установлено специальными исследованиями, проведенными В. П. Ивановой и другими исследователями, термический

Рис. П-21. Дифференциальные кривые нагревания минералов группы гидрослюд.

1 — гидрослюда; 2 — гидромусковит; 3 — глауконит.

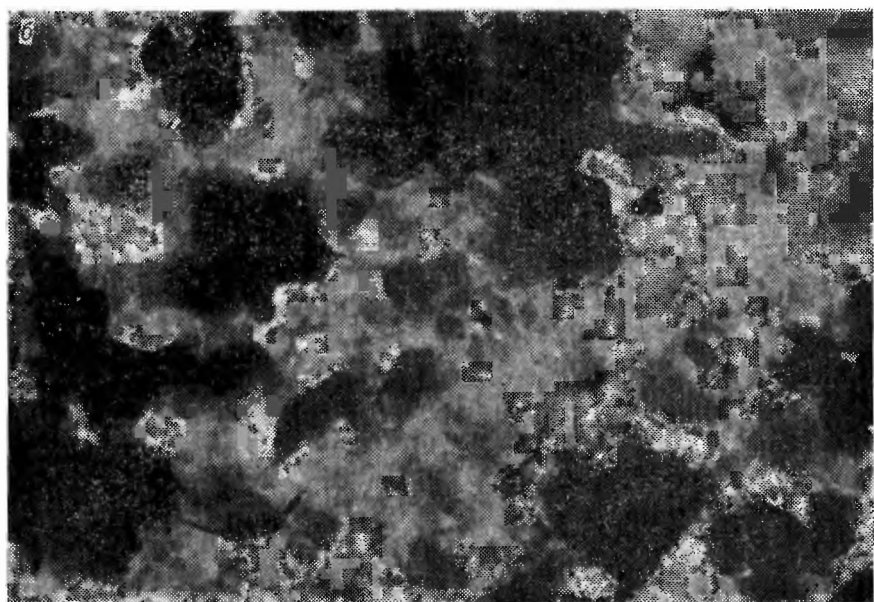
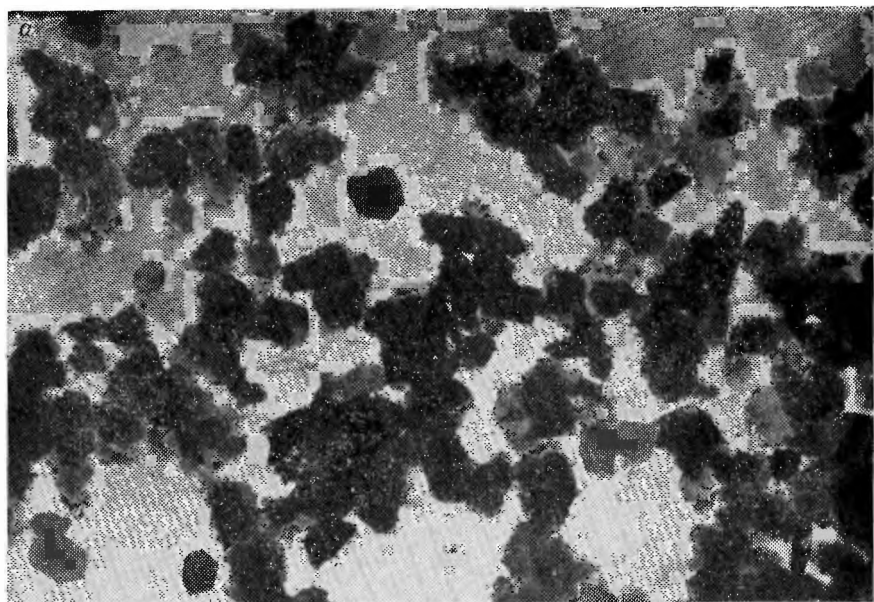


анализ позволяет выявлять присутствие в породе даже незначительной примеси органики, карбонатов, сульфатов и других минералов, кривые нагревания которых характеризуются резко выраженными эндо- и экзотермическими эффектами. Так, например, незначительная примесь органического вещества в породе обуславливает на кривых нагревания экзотермический эффект в интервале 300—400 °С. Водные окислы железа в этом же интервале дают эндотермическую реакцию, а присутствие пирита вызывает экзотермическую реакцию несколько выше 400 °С.

Вторым методом термического анализа является термовесовой, позволяющий наблюдать и регистрировать потерю массы вещества в процессе непрерывного нагревания. Анализ ведется на специальной термовесовой установке. На кривых потери массы по оси абсцисс отмечают температуру, а по оси ординат — потерю массы в процентах. Потеря массы происходит вследствие дегидратации минералов, содержащих воду, или выделения какой-либо газообразной фазы, например CO_2 из карбонатов. Этот метод дает возможность получить количественную характеристику минеральных фаз породы. Особенно хорошие результаты получаются при анализе карбонатных пород. Однако для глинистых минералов метод количественного анализа еще недостаточно разработан, трудоемок и применяется только наряду с другими методами при решении специальных задач, а не в массовой работе.

Электронно-микроскопический метод

Электронная микроскопия — один из методов изучения вещества с помощью электронных волн. Для получения изображения изучаемого объекта в электронном микроскопе используют направленный поток электронов, которым просвечивают препарат. При этом для увеличения изображения используется система электромагнитных линз. Поток электронов, достигая препарата, рассеивается на частицах. В зависимости от их



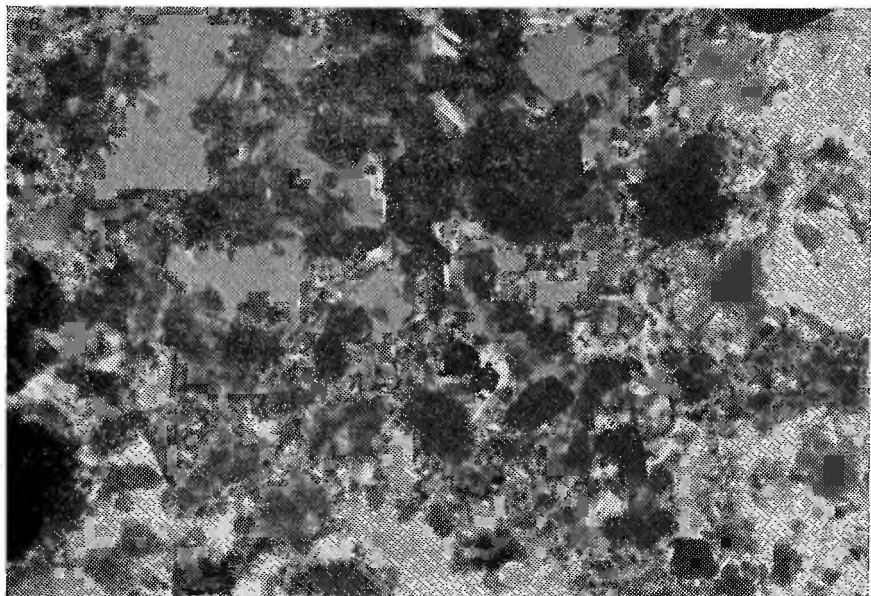


Рис. П-22. Электронно-микроскопические снимки глинистых минералов.
а — каолинит; *б* — монтмориллонит; *в* — гидрослюда.

толщины не все электроны достигают экрана, и поэтому на нем получаются более темные и менее темные — серые изображения, характеризующие относительную толщину рассматриваемых частиц, их размеры и форму. При этом для изучения препаратов используются увеличения до 25 000 раз и более. Это позволяет с успехом применять электронный микроскоп для изучения тонкодисперсных глинистых пород, тонкие фракции которых плохо поддаются изучению под обычным световым микроскопом.

Для изучения тонкодисперсных пород с помощью электронного микроскопа готовят специальные препараты из естественных образцов. Навеску 1—3 г замачивают в дистиллированной воде, слегка растирают резиновым пестиком и сливают в пробирку. После суточного отстаивания суспензии из ее верхнего столба высотой 5—7 см, содержащего в основном частицы $<0,001$ мм, берут пробу, которую наносят на тонкие пленки-подложки (толщиной около 10^{-5} мм) и высушивают на воздухе. Приготовленный таким образом препарат просматривают в электронном микроскопе на светящемся экране и фотографируют с помощью имеющейся в микроскопе фотокассеты. Полученные микрофотографии дают представление

о морфологии частиц тонкой фракции, т. е. об их форме, размерах, относительной толщине и резкости очертаний.

Имеющийся опыт электронно-микроскопического исследования глинистых минералов и глин и накопленный материал показывают, что частицы разных минеральных групп обладают различными морфологическими особенностями. Это и лежит в основе расшифровки электронно-микроскопических снимков и определения по ним состава породы, установления степени ее однородности и наличия тех или иных примесей (рис. II-22).

При изучении глин смешанного минерального состава на электронно-микроскопических снимках наблюдаются частицы всех входящих в состав смеси компонентов. Так, например, изучение искусственных смесей глинистых минералов показало, что с помощью электронного микроскопа можно определить не только минеральный состав смеси, но и количественное содержание отдельных составляющих с точностью до 10 %. Вообще же с помощью электронного микроскопа можно обнаружить в препарате примеси при содержании их в количестве 1—3 %. Кроме того, на электронно-микроскопических снимках хорошо фиксируются встречающиеся в глинах минералы-примеси, как, например, окислы железа, карбонаты, пирит, тонкодисперсный кварц, магнезиальные силикатные минералы (сепиолит, палыгорскит) и др. Окислы железа проявляются в виде мелких черных точек или образуют кристаллики крестовидной и звездчатой формы. Зерна кальцита имеют вид непрозрачных ромбов, иногда слегка окатанных. Кристаллы сепиолита и палыгорскита представлены частицами удлинённой нитевидной формы с резкими очертаниями. Пирит на снимках имеет вид черных мелких кубиков.

При изучении минерального состава глинистых пород с помощью электронного микроскопа кроме прямого метода применяют и косвенный. При этом методе в микроскопе просвечивающего типа исследуют не сам препарат, а отпечаток (слепок) с рельефа его поверхности, называемый репликой. Рассматривая под микроскопом и фотографируя эту реплику, можно получить представление о размере и форме частиц и агрегатов, об их ориентировке и взаимном расположении в породе естественного сложения. Это дает возможность получить представление о некоторых микротекстурных особенностях породы. Отпечатки-реплики получают как с искусственно приготовленных препаратов (пришлифовок), так и со сколов и срезов образцов породы естественного сложения. Данные о строении породы, получаемые в результате таких электронно-микроскопических исследований, могут быть полезными для объяснения особенностей ее свойств.

Структурный анализ (рентгенографический и электронографический)

Данные окрашивания, термического и электронно-микроскопического анализов в ряде случаев оказываются недостаточными для точной диагностики глинистых минералов изучаемого образца. Тогда приходится применять структурный анализ, позволяющий однозначно определять структуру минерала и точно диагностировать его. В настоящее время для определения структуры глинистых минералов применяют два метода: рентгенографический, использующий рентгеновские лучи, и электронографический, использующий электронные волны.

В основе рентгеноструктурного анализа лежит явление дифракции рентгеновских лучей от узловых плоскостей кристаллической решетки, которые находятся друг от друга на определенном расстоянии d . Получаемые в результате исследования методом порошка дифракционные картины (дебаграммы) глинистых минералов позволяют рассчитать набор значений d — межплоскостных расстояний кристаллической решетки и определить интенсивность соответствующих рефлексов (отражений) I . Как правило, этих данных достаточно для определения структуры вещества. С помощью имеющихся справочников-определителей, содержащих значения I и d различных минералов, производится диагностика исследуемого образца.

В основе второго вида структурного анализа — электронографического, приобретающего сейчас при изучении глин все большее значение, лежит явление дифракции электронов от атомов, расположенных в узлах кристаллической решетки. Кристаллическую решетку можно представить себе состоящей из отдельных повторяющихся элементарных ячеек. Каждый минерал имеет свою определенную структуру и, следовательно, свою элементарную ячейку.

Характер дифракционных картин (рис. II-23) определяется структурой минерала. Следовательно, производя анализ геометрических особенностей дифракционных картин, можно определять размеры элементарной ячейки (a , b , c и углы α и β ; угол $\gamma = 90^\circ$ при моноклинной сингонии, к которой относятся глинистые минералы). Анализ интенсивностей рефлексов электронограммы позволяет установить даже положение атомов внутри ячейки. Если изучаемый объект является смесью нескольких глинистых минералов, то на электронограмме будет отражено несколько дифракционных картин и в результате расчета будет получено несколько элементарных ячеек. Для проведения подобных структурных исследований электронный микроскоп снабжен электронографической насадкой. Кроме того, существует специальный прибор — электронограф. Препараты для электронографии готовятся аналогично электронно-микроскопи-

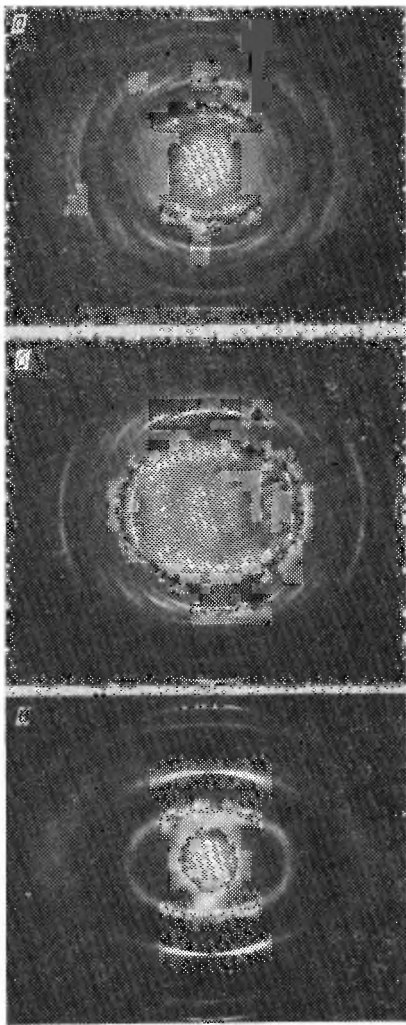


Рис. II-23. Электронограммы глинистых минералов.
а — каолинит; б — гидрослюда; в — монтмориллонит.

ческим препаратам, т. е. осаждением частиц суспензии на тончайшие пленки-подложки.

Каждый из методов структурного анализа имеет свои достоинства и недостатки. Однако при исследовании глин и глинистых минералов электронография благодаря выразительности электронограмм и ряду других факторов (краткость экспозиции, возможность визуального наблюдения дифракционной картины и пр.), пожалуй, более эффективна, чем рентгенография.

§ 6. ИЗУЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

Главнейшими породообразующими минералами карбонатных пород являются кальцит, доломит и терригенные минералы; реже присутствуют сидерит, магнезит и другие карбонатные минералы. В зависимости от количественного соотношения в породе кальцита и доломита наблюда-

ются постепенные переходы от чистых известняков к чистым доломитам, а в зависимости от соотношения карбонатной и терригенной составляющих выделяется ряд смешанных (переходных) разновидностей пород от известняков и доломитов к глинам либо к песчаникам в зависимости от состава терригенной части. Существенной, а иногда и господствующей частью карбонатных пород являются скелетные остатки различных организмов и их обломки. Для таких пород характерны органогенные структуры, диагностика их трудностей не представляет.

Диагностика и классификация пород известняково-доломитового ряда и карбонатно-глинистого ряда более трудны. Для этого необходимо знать состав и содержание карбонатных минералов в породе, а также состав и содержание терригенной составляющей, образующей нерастворимый остаток при воздействии на породы раствором соляной кислоты.

Для предварительной диагностики и определения минерального состава карбонатных пород производят их макроскопическое изучение и исследование в шлифах. Для более точной диагностики и классификации необходимо применять химический и термический анализы, исследование в иммерсионных жидкостях и методы окрашивания различными красителями.

Из химических анализов в практике инженерно-геологического изучения карбонатных пород применяют главным образом анализы солянокислых вытяжек из них. Для приготовления солянокислой вытяжки породу растирают в ступке в порошок и высушивают в термостате при температуре 100—105 °С. Затем берут навеску 1—3 г, заливают ее в химическом стакане 2,5 %-ным раствором соляной кислоты и нагревают до кипения, периодически взбалтывая. Отношение породы к объему кислоты берут равным 1:100 (0,5 г породы кипятят в 50 мл HCl в течение 5 мин). Прекращение выделения пузырьков газа и неизменяющаяся окраска нерастворимого остатка означает, что разрушение карбонатов закончено. Нерастворимый остаток отфильтровывают, промывают 5—6 раз горячей водой, прокаливают до постоянной массы и взвешивают. Разница между первоначальной массой пробы и массой нерастворимого остатка является массой карбонатных солей. На этом заканчивается сокращенный химический анализ солянокислой вытяжки. Он позволяет определить общее содержание карбонатов в породе (их карбонатность) и содержание нерастворимого остатка, которые выражают обычно в процентах.

Для полного изучения состава солянокислой вытяжки фильтрат подвергают химическому анализу, при котором определяют CaO , MgO , SO_3 , SiO_2 , R_2O_3 ; если в породе присутствуют железистые карбонаты, в вытяжке определяют CaO , MgO , SO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 . Результаты анализа выражают в процентах на абсолютно-сухую породу. Для пересчета результатов анализа на солевой и минеральный состав обязательно следует определять содержание в породе CO_2 в процентах от массы породы. Содержание CO_2 определяют в приборе Кноппа — Фрезениуса или более грубо в кальциметре. Умножая величину CO_2 (в процентах от массы породы) на коэффициент 2,274, получают содержание CaCO_3 в породе (в процентах). Определив в вытяжке количество CaO и MgO и в отдельной пробе CO_2 , результаты пересчитывают на солевой, а затем на минеральный состав в следующем порядке.

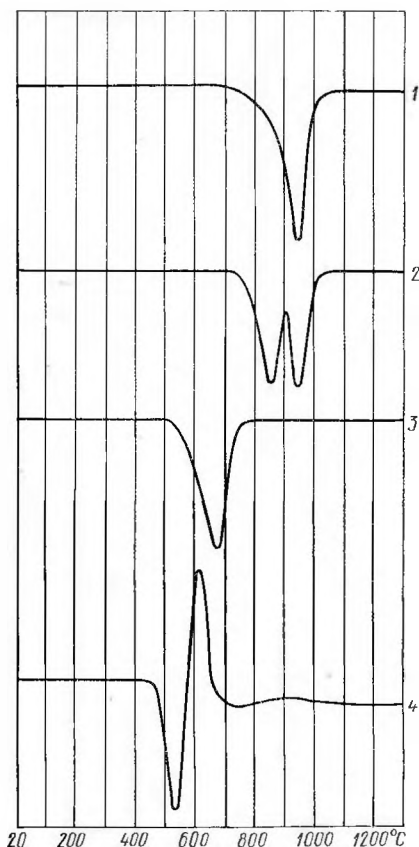


Рис. 11-24. Дифференциальные кривые нагревания карбонатных минералов.

1 — кальцит; 2 — доломит; 3 — магнезит; 4 — сидерит.

Процентное содержание СаО умножают на пересчетный коэффициент 1,785 и получают содержание СаСО₃ (в процентах). Вычитанием из СаСО₃ содержания СаО определяют содержание СО₂ в СаСО₃. Из общего содержания СО₂ вычитают эту же затраченную часть СО₂ и определяют таким образом количество СО₂, участвующее в образовании MgCO₃. По полученному остатку СО₂, умножая его на переходный коэффициент 1,916, находят величину MgCO₃, входящую в доломит. Умножая количество MgCO₃ (%) на 2,188, высчитывают содержание доломита, а затем вычитанием содержания доломита из суммы СаСО₃ и MgCO₃ находят содержа-

ние кальцита. Для проверки анализа рекомендуется по рассчитанному содержанию MgCO₃ найти содержание MgO ($MgO = MgCO_3 \times 0,478$) и сравнить его с количеством MgO, полученным по анализу.

Часто аналитически полученное содержание MgO бывает больше расчетного вследствие разрушения силикатов в кислоте вместе с карбонатами. При наличии в породе гипса и ангидрита при расчете результатов анализа на соли сначала по полученному количеству сульфатного иона вычисляют содержание СаSO₄, затем требуемое для этой соли количество СаО вычитают из общей аналитически определенной массы этого окисла. Дальнейшие расчеты карбонатов ведут так же, как было описано выше. Величину СаSO₄ пересчитывают на СаSO₄·2H₂O. При наличии в породе не гипса, а только ангидрита этот пересчет не делают.

Для изучения минерального состава карбонатных пород

с успехом применяется термический анализ, так как разложение каждого из карбонатных минералов происходит при определенных температурах. Поэтому кривые нагревания для каждого минерала имеют свои характерные черты (рис. II-24): кальцит — один эндотермический эффект при температуре 920 °С; доломит — два при температуре 710—770 и 880—950 °С; магнезит — один при 570—650 °С и т. д. Хорошие результаты при анализе карбонатных пород дает термовесовой метод, так как при их нагревании происходит выделение CO₂. Это дает возможность получить количественную характеристику минерального типа породы.

Надежные результаты при изучении минерального состава карбонатных пород получают, исследуя их в иммерсионных жидкостях, так как карбонатные минералы заметно различаются по показателям преломления и закономерным изменениям оптических свойств с изменением состава. Наконец, для диагностики карбонатных минералов и пород широко применяют метод окрашивания их различными красителями. Этот метод хотя и не всегда дает надежные результаты, однако он прост, позволяет быстро исследовать породы, и поэтому доступен при массовых анализах.

§ 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАРБОНАТНОСТИ КАРБОНАТНО-ГЛИНИСТЫХ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

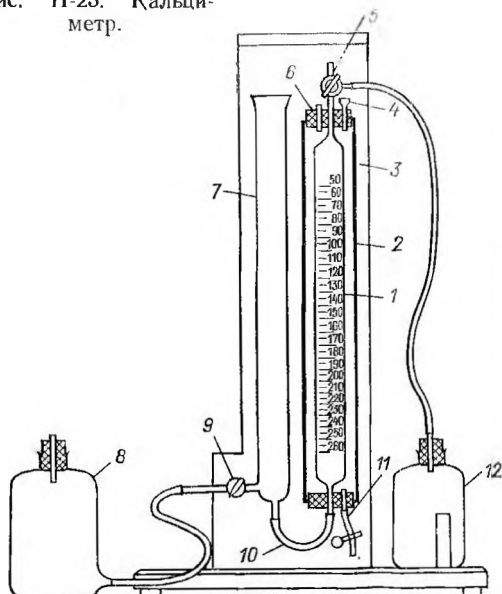
Определение карбонатности карбонатно-глинистых пород и количества карбонатов в глинистых породах необходимо для правильной их классификации, прогноза свойств, оценки пригодности для использования как сырья в различных отраслях промышленности, а также для решения генетических вопросов и других задач. Как отмечалось выше, карбонаты в карбонатно-глинистых, а также в глинистых породах представлены главным образом углекислыми солями кальция и магния. Простейшим методом определения карбонатности пород является объемный. Сущность его состоит в определении с помощью особого прибора — кальциметра — объема CO₂, выделяющегося из растертой породы при обработке ее соляной кислотой:



По объему вытесненной из породы углекислоты вычисляют содержание в ней CaCO₃. В доломитизированных породах объем вытесненной углекислоты следует пересчитывать на карбонаты кальция и магния.

Кальциметр, применяемый для таких исследований, показан на рис. II-25. Он состоит из бюретки 1, градуированной до 260 см³, помещенной в закрытый стеклянный цилиндр 2, укрепленный на штативе 3. Защитный цилиндр сверху и снизу закрыт пробками. В верхней пробке имеются воронка 4 для заплот-

Рис. 11-25. Кальци-
метр.



нения цилиндра водой и трубка 6 для выхода воздуха. Нижняя пробка имеет трубку 11 с зажимом для слива воды. Нижний конец бюретки резиновой трубкой 10 соединен с уравнительным стеклянным цилиндром 7, укрепленным на том же штативе. Уравнительный цилиндр в нижней части имеет боковой отвод с краном 9. Кран резиновой трубкой соединен с тубусом бутылки 8, закрытой пробкой с отводной трубкой. Верхний конец бюретки имеет трехходовой кран 5, соединенный резиновой трубкой со специальной склянкой 12, в которую

впяна пробирка. В этой склянке производится обработка породы кислотой. Перед анализом прибор проверяют на герметичность, а затем бюретку и сообщающийся с ней уравнительный цилиндр заполняют насыщенным раствором хлористого натрия до метки на верхнем конце бюретки. Анализ породы производят следующим образом.

Из пробы породы, растертой в порошок и высушенной при температуре 100—105 °С, берут навеску: 1 г для пород, сильно вскипающих от действия 10 %-ного раствора HCl ; 2 г для продолжительно вскипающих; 3 г для явно, но кратковременно вскипающих; 5 г для пород, вскипающих слабо и кратковременно; навеску помещают в специальную склянку 12. При помощи пипетки во впаянную пробирку осторожно наливают 10 %-ную соляную кислоту из расчета 10 см³ на 1 г породы. Поворотом трехходового крана 5 соединяют бюретку 1 со склянкой 12, после чего склянку наклоняют и выливают соляную кислоту из пробирки. Склянку 12 следует несколько раз встряхнуть, чтобы порода была полностью смочена кислотой. Выделяющаяся при этом углекислота будет поступать в бюретку и вытеснять из нее жидкость. Открыв кран 9 в уравнительном цилиндре 7, дают возможность части жидкости, вытесняемой газом, стечь в бутылку 8, пока уровень жидкости в цилиндре не установится на уровне в бюретке. Когда выделение пузырьков углекислоты из породы прекратится, уровень жидко-

Т а б л и ц а II-10. Масса 1 см³ CO₂ (мг) в зависимости от температуры и давления

Темпера- тура T , °C	Атмосферное давление p , мм рт. ст. (133,3 Па)													
	742	744	747	749	751	753,5	756	758	760	762,5	765	767	769	771
28	1,778	1,784	1,791	1,797	1,804	1,810	1,817	1,823	1,828	1,833	1,837	1,842	1,847	1,852
27	1,784	1,790	1,797	1,803	1,810	1,816	1,823	1,829	1,834	1,839	1,843	1,848	1,853	1,858
26	1,791	1,797	1,803	1,809	1,816	1,822	1,829	1,835	1,840	1,845	1,848	1,854	1,859	1,864
25	1,797	1,803	1,810	1,816	1,823	1,829	1,836	1,842	1,847	1,852	1,856	1,861	1,866	1,871
24	1,803	1,809	1,816	1,822	1,829	1,835	1,842	1,848	1,853	1,858	1,862	1,867	1,872	1,877
23	1,809	1,815	1,822	1,828	1,835	1,841	1,848	1,854	1,859	1,864	1,868	1,873	1,878	1,883
22	1,815	1,821	1,828	1,834	1,841	1,847	1,854	1,860	1,865	1,870	1,875	1,880	1,885	1,890
21	1,822	1,828	1,835	1,841	1,848	1,854	1,861	1,867	1,872	1,877	1,882	1,887	1,892	1,897
20	1,828	1,834	1,841	1,847	1,854	1,860	1,867	1,873	1,878	1,883	1,888	1,893	1,898	1,903
19	1,834	1,840	1,847	1,853	1,860	1,866	1,873	1,879	1,884	1,889	1,894	1,899	1,904	1,909
18	1,840	1,846	1,853	1,859	1,866	1,872	1,879	1,885	1,890	1,895	1,900	1,905	1,910	1,915
17	1,846	1,853	1,860	1,866	1,879	1,879	1,886	1,892	1,897	1,902	1,907	1,912	1,917	1,922
16	1,853	1,860	1,866	1,873	1,879	1,886	1,892	1,898	1,903	1,908	1,913	1,918	1,923	1,928
15	1,859	1,866	1,872	1,879	1,886	1,892	1,899	1,905	1,910	1,915	1,920	1,925	1,930	1,935
14	1,865	1,872	1,878	1,885	1,892	1,899	1,906	1,912	1,917	1,922	1,927	1,932	1,937	1,942
13	1,872	1,878	1,885	1,892	1,899	1,906	1,913	1,919	1,924	1,929	1,934	1,939	1,944	1,949
12	1,878	1,885	1,892	1,899	1,906	1,912	1,919	1,925	1,930	1,935	1,940	1,945	1,950	1,955
11	1,885	1,892	1,899	1,906	1,913	1,919	1,926	1,932	1,937	1,942	1,947	1,952	1,957	1,962
10	1,892	1,899	1,906	1,913	1,920	1,926	1,933	1,939	1,944	1,949	1,954	1,959	1,964	1,969

сти в бюретке станет неизменным. Когда это условие будет достигнуто, и уровни жидкости в бюретке и цилиндре будут на одной высоте при закрытом кране 9, производят отсчет объема углекислоты. Чтобы объем углекислоты в бюретке не подвергался изменению от случайных перемен температуры, в защитный цилиндр 2, служащий термостатом, наливают воды.

Зная количество выделившейся углекислоты, можно путем пересчета получить количество углекислого кальция, находящегося в исследуемой породе:

$$x = Vb \cdot 10 / (44a),$$

где x — процентное содержание CaCO_3 в исследуемой породе; V — объем углекислоты, вытесненной из породы; b — масса 1 cm^3 углекислоты, определяемая по табл. II-10, мг; a — масса навески породы, взятая для анализа, г; 44 — молекулярная масса CO_2 .

Пример. $V = 210 \text{ cm}^3$; $a = 1,5 \text{ г}$. Температура, при которой происходило измерение объема газа, 18°C ; давление по барометру 758 мм рт. ст. ($10 \cdot 10^5 \text{ Па}$). По табл. II-10 масса 1 $\text{cm}^3 \text{ CO}_2$ равна 1,865 мг. Отсюда

$$x = \frac{210 \cdot 1,865 \cdot 10}{44 \cdot 1,5} = 59,9 \% \text{ CaCO}_3.$$

§ 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ И СОСТАВА ВОДОРАСТВОРИМЫХ СОЛЕЙ В ГЛИНИСТЫХ ПОРОДАХ

В некоторых карбонатных и особенно в глинистых породах иногда присутствуют водорастворимые соли, которые обуславливают их неустойчивость при воздействии воды. При выщелачивании солей обычно изменяются плотность сложения пород, их связность, устойчивость и водопроницаемость. В процессе растворения и выщелачивания солей может изменяться в породах состав поглощенных катионов, которые существенно влияют на их свойства. Наконец, при растворении солей изменяются состав и свойства фильтрующейся воды, которая может стать агрессивной по отношению к бетонным и металлическим частям конструкций сооружений.

Все это вызывает необходимость определять содержание и состав водорастворимых солей в глинистых породах при их инженерно-геологической оценке. Причем, если содержание таких солей составляет более 0,3 % от массы сухой породы, то такую породу называют засоленной. Среди растворимых солей в засоленных породах встречаются легкорастворимые, т. е. хлористые, сернокислые и карбонатные соли натрия, калия, магния и кальция (галит NaCl , сильвин KCl , мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, сода Na_2CO_3), и среднерастворимые — сульфаты кальция (гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ангидрит CaSO_4). Легкорастворимые соли растворяются в воде быстро и в небольшом ее объеме, среднераство-

римые растворяются медленно, для полного их растворения необходимо большое количество воды.

При определении водорастворимых солей в породах применяют такие рациональные химические анализы, как анализы водных и солянокислых вытяжек. Водные вытяжки применяют для определения главным образом состава и содержания в породах легкорастворимых солей. В водную вытяжку переходит также и гипс, если содержание его мало. Если содержание гипса и ангидрита повышенное, то для их определения, как и для определения карбонатности пород, применяют солянокислые вытяжки (см. § 6).

Водная вытяжка готовится из воздушно-сухой породы, растертой в ступке в порошок. Навеску 5—20 г (в зависимости от степени засоленности пород) заливают свежeproкипяченной горячей дистиллированной водой. Отношение породы к объему воды берется равным 1:20. Колбу ставят на теплую плитку или очень слабо кипящую водяную баню и настаивают вытяжку в течение 10—15 мин при частом помешивании. Затем нерастворимому остатку в колбе дают отстояться, а осветлившуюся часть жидкости сливают через фильтр в другую колбу. На этом заканчивается подготовка водной вытяжки для анализа.

Водную вытяжку можно приготовить и другим способом. Навеску заливают свежeproкипяченной дистиллированной водой в колбе или бутылки и плотно закрывают их пробкой. Отношение породы — вода принимается равным также 1:20. Вытяжкуготавливают взбалтыванием породы с водой в течение 10—15 мин вручную или на механической мешалке. Затем весь объем жидкости фильтруют в колбу.

В водной вытяжке определяют содержание $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . Результаты анализа выражают в миллиграммах на 100 г породы или в процентах на воздушно-сухую породу. Для определения водорастворимых составляющих в породе узнают количество сухого остатка, который остается при выпаривании водной вытяжки.

§ 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОДАХ

При инженерно-геологическом изучении песчаных и особенно глинистых пород весьма важно знать содержание в них органического вещества (растительных остатков той или иной степени разложения — гумификации), которое влияет на их физические, водные и механические свойства. С увеличением содержания органики и повышением степени ее разложенности заметно усиливаются коллоидные свойства пород, повышается их гидрофильность, влагоемкость, деформируемость и снижается прочность. Поэтому при содержании в песчаных породах растительных остатков от 3 до 10 %, а в глинистых от 5 до 10 %

обязательно отмечают их присутствие. Породы, содержащие от 10 до 60 % органики, называют гумусированными или заторфованными. Породы, содержащие более 60 % органики, относят к торфам (СНиП II—А. 10—62). Породы сильногумусированные, заторфованные и торф по инженерно-геологической классификации принадлежат к пятой группе, т. е. к породам слабым, особого состава и происхождения.

В настоящее время не существует универсальных методов количественного определения содержания органического вещества в породах. В практике инженерно-геологических исследований чаще всего пользуются методами прокаливания, колориметрическим и реже другими. Метод прокаливания состоит в том, что породу прокаливают при температуре 400—900 °С, органическое вещество при этом выгорает, и по потере массы определяют общее его содержание в процентах от абсолютно-сухой навески породы.

Следует иметь в виду, что потери при прокаливании для некоторых песчано-глинистых пород не могут точно характеризовать содержание в них органического вещества. При прокаливании пород кроме сгорания органического вещества происходит удаление химически связанной воды из минеральной части породы, разложение карбонатов, хлоридов и других соединений, сопровождающееся выделением газообразной фазы, что также ведет к уменьшению массы породы. Поэтому потери от прокаливания позволяют только ориентировочно судить об относительном содержании органики в породах. Однако для инженерно-геологической оценки такие данные в большинстве случаев оказываются достаточными. Этот метод лучше применять для пород заторфованных, сильногумусированных, бедных карбонатами.

Метод колориметрии основан на свойстве гуминовых кислот давать со щелочью окрашенные растворы. Окрашенная щелочная вытяжка из породы сравнивается с эталоном, по которому и определяют содержание органики в породе. Этот метод дает также приближенные данные, так как гуминовые кислоты разного происхождения обладают различными цветовыми оттенками и интенсивностью окраски.

Более точные методы определения содержания органического вещества в породах и почвах основаны на определении основных его компонентов — углерода и азота, по которым рассчитывают общее содержание органического вещества в породе. Удобнее и точнее определять его по углероду. Для этого применяют методы сухого сжигания, мокрого сжигания по Кюппу, окисления по Тюрину и др.

При сухом сжигании органическое вещество породы сжигается прокаливанием при полном доступе кислорода и окислении всего органического углерода до газа CO_2 , который улавли-

вается специальным поглотителем и взвешивается; количество в породе $C_{орг}$ (%) рассчитывается по формуле

$$C_{орг} = a \cdot 0,2729 \cdot 100/B,$$

где a — разность массы поглотителя до и после прокаливании породы; 0,2729 — коэффициент для пересчета CO_2 на $C_{орг}$; B — общая масса навески, г.

Для пересчета органического углерода на органическое вещество применяется коэффициент 1,727, предложенный К. К. Гедройцем.

Если в породе присутствуют карбонаты, они перед определением органического вещества разлагаются разбавленной соляной кислотой с отгонкой CO_2 . В подготовленной таким образом навеске определяют уголекислоту CO_2 , образующуюся за счет окисления углерода органики при ее сжигании. Уголекислота органическая может определяться также по разности между общим количеством CO_2 , полученным методом сжигания, и CO_2 карбонатной.

При методе мокрого сжигания по Кноппу органическое вещество в породе определяют также окислением углерода до CO_2 хромовым ангидридом Cr_2O_3 в присутствии серной кислоты. Уголекислый газ улавливают, взвешивают и по его содержанию, как и в предыдущем случае, вычисляют $C_{орг}$ и затем органическое вещество.

Метод окисления по Тюрину основан на учете расхода бихромата $K_2Cr_2O_7$ на окисление углерода органического вещества до CO_2 .

Методы определения органического вещества, основанные на использовании окислителей, применимы только для пород, не содержащих закисных форм минералов.

§ 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ И СОСТАВА ОБМЕННЫХ ИОНОВ В ГЛИНИСТЫХ ПОРОДАХ

На физико-механические свойства глинистых пород значительное влияние оказывают их обменная способность и состав обменных ионов. Чем выше обменная способность глинистых пород, тем большее влияние на их физико-механические свойства оказывает состав обменных (поглощенных) ионов, тем выше их коллоидно-химическая активность и чувствительность к изменениям окружающей среды. Поэтому прежде всего следует определять емкость поглощения глинистой породы. Если она окажется достаточно высокой (более 5—10 мг-экв на 100 г породы), то необходимо далее определять состав обменных ионов; если же емкость поглощения будет ниже указанной величины, то определять состав поглощенных ионов не имеет смысла, так как влияние их на свойства породы будет практически незначительным.

Существует большое число разнообразных методов определения емкости поглощения и состава обменных ионов. Для определения емкости поглощения глинистых пород, не содержащих карбонатов и сульфатов, широко применяется метод Е. В. Бабко и О. Л. Аскинази. Этот метод состоит в том, что обменные катионы вытесняются из породы ионом бария 1,0н. раствором BaCl_2 в связи с тем, что барий в глинистых породах практически отсутствует. После насыщения исследуемого вещества барием ионы бария вытесняют 1,0н. раствором соляной кислоты. Затем в фильтрате определяют содержание бария и по количеству его судят о емкости поглощения. Анализ рекомендуется вести при $\text{pH}=6,5$, так как при более низких значениях pH понижается обменная способность породы, а при более высоких возникает опасность выпадения из раствора карбоната бария. Если в породе содержится гипс, то его предварительно удаляют путем обработки породы 0,2н. раствором HCl до отрицательной реакции на SO_4^{2-} .

Другим методом определения емкости поглощения как карбонатных, так и некарбонатных пород является метод О. В. Захарчука [1953 г.]. Сущность метода состоит в том, что для вытеснения из породы поглощенных катионов применяется 0,05н. раствор соляной кислоты. Затем порода, насыщенная водородом, промывается 1,0н. раствором уксуснокислого кальция для вытеснения ионов водорода. Образующаяся при этом уксусная кислота оттитровывается 0,1н. раствором щелочи, по количеству которой и определяется емкость поглощения исследуемой породы. Для определения свободной соляной кислоты, удержанной породой (непоглощенного водорода), навеску породы 100 г обрабатывают тем же раствором HCl . Затем из нее делают водную вытяжку, в которой определяют соляную кислоту. При вычислении емкости поглощения учитывается количество ионов водорода, найденное в водной вытяжке.

Кроме этих наиболее распространенных методов определения емкости поглощения применяется и ряд других. Например, ускоренный метод С. С. Филатова [1955 г.], основанный на применении 0,05н. водно-спиртового раствора олеата калия; метод С. Г. Рыдкого, Ф. Г. Яновской и К. Б. Орловой [1955 г.], основанный на применении радиоактивного изотопа кальция, и ряд других методов, освещенных в специальных работах.

Особо следует остановиться на быстром и простом методе определения емкости поглощения глин по количеству адсорбированного ими красителя метиленового голубого (МГ) или метилвиолета (МВ). Этот метод предложен Р. Робертсоном и Р. Уордом [1951 г.]. Т. С. Берлин в лаборатории ВСЕГЕИ проверила этот метод, уточнила его и рекомендовала для определения емкости поглощения глин в тех случаях, когда не требуется характеристики состава поглощенных ионов. Поскольку в ин-

женерно-геологической практике всегда прежде всего требуется определение емкости поглощения глинистых пород, этот метод может быть рекомендован для более широкого применения. Сущность его состоит в следующем.

1. Из глинистой породы, измельченной и просеянной через сито 0,1 мм, берут навеску 0,3 г и помещают в конусообразную колбу вместимостью 150 мл.

2. Приготавливают водный 0,3 %-ный раствор метиленового голубого или метилвиолета.

3. При помощи пипетки берут точно 50 мл этого раствора и заливают в колбу с породой.

4. Все содержимое колбы встряхивают в течение 20 мин.

5. Полученный раствор отфильтровывают от породы через плотный фильтр (синяя лента). Но так как фильтр сам вначале поглощает немного красителя, то его предварительно хорошо смачивают фильтруемым раствором. Поэтому же первые порции прошедшего через фильтр раствора выливают.

6. Из прошедшего через фильтр раствора берут бюреткой точно 5 мл и разбавляют до 500 мл дистиллированной водой.

7. Чтобы определить концентрацию полученного раствора, используют фотокolorиметр.

Предварительно подготавливают стандартные растворы МГ следующих концентраций (%): 0,0005, 0,001, 0,002, 0,003, 0,004, 0,005 и по ним строят калибровочную кривую — график, на котором по оси абсцисс наносят концентрации МГ или МВ, а по оси ординат — оптическую плотность растворов. По этому графику в дальнейшем и определяют концентрацию исследуемых растворов.

8. Определив колориметрированием плотность исследуемого раствора и его концентрацию по графику, необходимо эту полученную величину умножить на 100, так как отфильтрованный раствор для колориметрирования был разбавлен в 100 раз (п. 6).

9. Расчет емкости поглощения производят по формуле

$$\epsilon = abd \cdot 100 / (B \cdot 100e),$$

где a — разность процентных содержаний МГ в растворе до и после обработки им породы; b — количество (мл) раствора МГ, взятое для анализа (50); d — процентное содержание красителя; B — навеска исследуемой породы с учетом гигроскопической воды (0,3 г); e — молекулярная масса красителя МГ, равная 319,9; 100 — мг-экв на 100 г породы.

Пример. В результате фотокolorиметрирования оптическая плотность исследуемого раствора получилась равной 0,25; соответствующая концентрация МГ — 0,0018. Умножив эту величину на 100, получим истинную концентрацию отфильтрованного раствора, равную 0,18. Так как раствор МГ брали 0,3 %-ный, а концентрация отфильтрованного раствора стала 0,018 %, то,

следовательно, поглотилось $MГ\ 0,30 - 0,18 = 0,12\ %$. Далее расчет производят по формуле.

Если необходимо определить не только емкость поглощения глинистой породы, но и состав обменных (поглощенных) ионов, то применяют следующие методы.

1. Метод К. К. Гедройца, основанный на использовании в качестве вытесняющего раствора 1,0н. раствора хлористого аммония NH_4Cl . Этот метод применяют для исследования некарбонатных пород. Навеску породы заливают в фарфоровой чашке 1,0н. раствором NH_4Cl так, чтобы покрыть ее всю, перемешивают, переносят на фильтр и промывают этим же раствором до полного вытеснения поглощенного кальция. Фильтрат выпаривают до определенного объема и в нем определяют содержание обменных катионов. Перед производством этого анализа из породы удаляют легкорастворимые соли.

2. Метод вытеснения обменных катионов аммонийным ионом уксуснокислого аммония.

Методы определения обменных катионов в карбонатных породах разработаны еще недостаточно и дают приближенные результаты. Чаще всего применяется метод И. В. Тюрина, основанный на том, что обработкой карбонатной породы $NaCl$ из нее извлекают карбонатный и обменный кальций и магний. Определяя общее количество карбонатов титрованием 0,02н. раствором HCl в одной порции фильтрата и общее содержание кальция и магния в другой, по разности узнают содержание в породе обменных катионов Ca и Mg .

Особо следует остановиться на определении в глинистых породах обменного натрия, поскольку он резко ухудшает их строительные качества. Наиболее широко применяются метод К. К. Гедройца и метод М. М. Годлина. Первый основан на вытеснении обменного натрия действием на породу бикарбоната кальция $Ca(HCO_3)_2$. Образующийся при этом бикарбонат натрия переходит в раствор и при выпаривании дает карбонат натрия, который и определяется объемным или весовым методом.

Метод М. М. Годлина основан на вытеснении поглощенного натрия раствором $Ca(OH)_2$ или раствором $Ba(OH)_2$. При этом образуется углекислый натрий, по которому и определяют содержание иона натрия. В случае присутствия в породе легкорастворимых солей они предварительно удаляются.

Для определения емкости поглощения и состава обменных катионов в лаборатории должны доставляться образцы массой 200—300 г, завернутые в чистую плотную бумагу.

Контрольные вопросы

1. Особенности петрографического изучения пород при исследовании их физико-механических свойств.

2. На какие основные элементы состава и строения горных пород сле-

дует обращать внимание при макроскопическом и микроскопическом их изучении?

3. Какими показателями можно пользоваться для количественной оценки микротекстуры глинистых пород?

4. Гранулометрический состав обломочных и глинистых пород и его практическое значение.

5. Фракции, выделяемые при классификации пород по гранулометрическому составу, и их характеристика.

6. Какие частицы следует относить к глинистым и почему?

7. Классификация глинистых пород четвертичного возраста по гранулометрическому составу.

8. Классификация песчаных пород по гранулометрическому составу.

9. Классификация гравелистых пород по гранулометрическому составу.

10. Методы гранулометрического анализа пород.

11. Виды подготовки пород к гранулометрическому анализу.

12. Какой из методов является основным для определения гранулометрического состава песчаных пород? Опишите его сущность.

13. Почему метод гранулометрического анализа Сабанина называется методом двойного отмучивания? Какие фракции выделяются этим методом?

14. Какова общая схема гранулометрического анализа пипеточным методом? Порядок вычисления содержания в породе каждой фракции.

15. Особенности определения гранулометрического состава засоленных пород.

16. Определение гранулометрического состава пород ареометрическим методом. Порядок пользования номограммой для вычисления диаметра частиц.

17. Каковы наиболее употребительные способы графического изображения гранулометрического состава пород?

18. Показатель неоднородности гранулометрического состава пород.

19. Какой метод наиболее часто применяют для изучения минерального состава отдельных фракций песчаных и глинистых пород?

20. Определение минерального типа глинистых пород с помощью органических красителей.

21. Термический анализ глинистых пород.

22. В чем сущность электронно-микроскопического изучения состава глинистых пород?

23. Какие методы применяют для диагностики и определения минерального состава карбонатных пород?

24. Устройство кальциметра и его применение для определения карбонатности карбонатно-глинистых и глинистых пород.

25. Определение содержания и состава водорастворимых солей в глинистых породах.

26. Определение содержания органического вещества в песчано-глинистых породах.

27. Определение емкости поглощения и состава обменных ионов в глинистых породах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Главнейшими физическими свойствами горных пород являются плотность минеральной части и плотность породы, пористость, а для пород полускальных, песчаных и глинистых также и влажность. Эти свойства взаимосвязаны и в целом выражают физическое состояние пород, т. е. их качественную определенность как в условиях естественного залегания, так и в теле сооружений (плотинах, дамбах, насыпях и др.) и отвалах.

Качественная определенность горных пород, проявляясь в их плотности, пористости, влажности, консистенции, а также в степени выветрелости и трещиноватости, составляет их отличительную особенность в отношении сопротивления разрушению и деформациям. Поэтому по основным физическим свойствам можно косвенно судить о прочности, деформируемости и устойчивости горных пород, а также об их измененности под влиянием геологических процессов и искусственных факторов. Качественная определенность горных пород сохраняется в пределах некоторого интервала количественных изменений их физических свойств. Это позволяет отличать по физическому состоянию одни разности пород от других, а в геологическом разрезе характеризовать определенным образом каждую толщу, слой, пачку, а в однородных по петрографическому составу породах выделять зоны и подзоны.

Природа физических свойств горных пород, показатели, их характеризующие, и факторы, влияющие на их величину, известны из теоретической части курса инженерной геологии [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.]. Сводка основных показателей физических свойств горных пород приведена в табл. III-1.

§ 2. ПЛОТНОСТЬ МИНЕРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Плотностью минеральной части горной породы называется масса ее минеральной части (скелета) в единице объема. Численно она равна отношению массы твердой минеральной части породы к ее объему. Плотность минеральной части горных пород определяют главным образом пикнометрическим методом (ГОСТ 5180—84).

Для ее определения необходимо иметь следующее оборудование: 1) пикнометр вместимостью 100 см³ (рис. III-1); 2) весы технические; 3) ступку с пестиком (фарфоровую для песчаных

Т а б л и ц а III-1. Основные характеристики физических свойств горных пород для оценки их физического состояния

Характеристики	Обозначение	Формула для вычислений	Единицы
Плотность минеральной части породы	ρ_m	$\rho_m = g_1/V_1^*$	г/см ³
Плотность породы	ρ	$\rho = \frac{g_1 + g_2}{V_1 + V_2}$	г/см ³ , т/м ³
Плотность скелета породы	$\rho_{ск}$	$\rho_{ск} = \frac{g_1}{V_1 + V_2} =$ $= \frac{\rho}{1 + 0,01W}$	г/см ³ , т/м ³
«Плотность» породы под водой (вес породы облегчен выталкивающей силой, равной весу вытесненного объема воды)	ρ'	$\rho' = (\rho_m - 1)(1 - n)$	г/см ³ , т/м ³
Влажность весовая	W	$W = \frac{g_1}{g_2} = \frac{\rho - \rho_{ск}}{\rho_{ск}}$	%
Влажность объемная	W_o	$W_o = W\rho_{ск}$	%
Полная влагоемкость (влагоемких пород) или полная водоемкость (невлагоемких пород)	W_n	$W_n = \frac{1}{\rho_{ск}} - \frac{1}{\rho_m} =$ $= \frac{n}{\rho_m(1 - n)}$	%
Коэффициент водонасыщения	G	$G = \frac{W}{W_n} = \frac{W\rho_m(1 - n)}{n} =$ $= \frac{W\rho_m}{e\rho_{ск}}$	Безразмерная
Пористость	n	$n = 1 - m = 1 - \frac{\rho_{ск}}{\rho_m}$	%
Коэффициент пористости	e	$e = \frac{n}{1 - n} = \frac{\rho_m - \rho_{ск}}{\rho_{ск}}$	Безразмерная
Коэффициент пористости породы естественного сложения и влажности (начальный)	e_0	$e_0 = \frac{n}{1 - n} = \frac{\rho_m - \rho_{ск}}{\rho_{ск}}$	Безразмерная

* При расчетах распределения напряжений от собственного веса пород, их нагрузки на сооружения вместо плотности пород следует пользоваться их удельным весом, отражающим влияние силы тяжести. Удельный вес (Н/м³) определяют из выражения $\gamma = \rho g$, где g — ускорение свободного падения.

Характеристики	Обозначение	Формула для вычислений	Единицы
Коэффициент пористости породы, насыщенной водой	e	$e = W \rho_m$	Безразмерная
Объем пор в 1 см ³ породы	n	$n = \frac{e}{1+e} = 1 - m$	см ³
Объем минеральной части в 1 см ³ породы	m	$m = \frac{1}{1+e} = 1 - n$	см ³
Объем газов в 1 см ³ породы	V_a	$V_a = \left(\frac{e}{\rho_m} - \frac{W}{\rho_v} \right) \rho_{ск}$	см ³
Предел пластичности глинистой породы	W_p		%
Предел текучести глинистой породы	W_T		%
Число пластичности	I_n	$I_n = W_T - W_p$	%
Показатель консистенции	B	$B = \frac{W - W_p}{I_n}$	Безразмерная
Показатель естественной уплотненности глинистой породы	K_d	$K_d = \frac{e_T - e_0}{e_T - e_p}$	Безразмерная
Коэффициент относительной плотности песчаной породы	I_d	$I_d = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} = \frac{(n_{max} - n)(1 - n_{min})}{(n_{max} - n_{min})(1 - n)}$	Безразмерная
Коэффициент уплотненности песчаной породы	U	$U = \frac{e_{max} - e_{min}}{e_{min}}$	Безразмерная

Примечание. V_1 — объем минеральной части — скелета породы; V_2 — объем пор в породе; g_1 — масса минеральной части — скелета породы; g_2 — масса воды, полностью или частично заполняющей поры в породе.

и глинистых пород, агатовую или яшмовую для скальных и полускальных); 4) сито с диаметром отверстий 2 мм; 5) бюксы стеклянные; 6) банку песчаную; 7) сушильный шкаф; 8) вакуумный насос (при исследованиях засоленных пород); 9) термометр; 10) дистиллированную воду или керосин (при исследованиях засоленных пород); 11) журнал (табл. III-2).

Последовательность определения

1. Пикнометр наливают дистиллированной водой до метки. Температура воды в нем должна быть 18, 20 или 22 °С. Взвешивают пикнометр на технических весах с точностью до 0,01 г.

Получают массу пикнометра с водой g_1 . При выполнении массовых определений плотности минеральной части горных пород рекомендуется заранее составить таблицу массы пикнометров с водой разной температуры, например при 18, 20 и 22 °C.

2. Пробу горной породы, находящуюся в воздушно-сухом состоянии, растирают пестиком в фарфоровой (агатовой) ступке и просеивают через сито с диаметром отверстий 2 мм. Частицы диаметром более 2 мм, оставшиеся на сите, размельчают в ступке и просеивают.

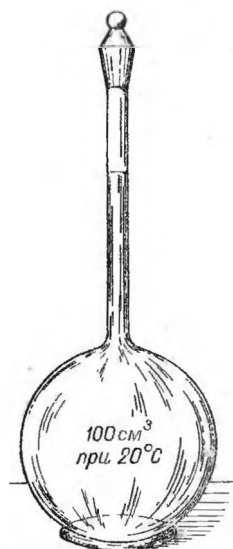
3. Из просеянной и тщательно перемешанной породы берут навеску около 15 г в стеклянный бюкс. Затем породу в бюксе высушивают в термостате при температуре 100—105 °C до постоянной массы, охлаждают в эксикаторе и переводят в предварительно взвешенный пикнометр. Пикнометр с породой взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г. Из массы пикнометра с породой вычитают массу пикнометра и получают массу сухой породы g .

4. Для удаления воздуха из породы пикнометр наполняют дистиллированной водой на 0,3—0,5 его вместимости и кипятят на песчаной бане (не допуская разбрызгивания) в течение 30 мин при исследовании грубозернистых пород и 1 ч при исследовании тонкозернистых и глинистых.

5. После кипячения пикнометр охлаждают в ванне с водой, доливают до метки дистиллированной водой и измеряют температуру воды, которая должна быть, как и в первом случае, равной 18, 20 или 22 °C. Уровень воды в пикнометре устанавливают строго по нижнему краю мениска, для чего микропипеткой добавляют или удаляют необходимое количество воды. Пикнометр тщательно обтирают и взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г и получают массу пикнометра с водой и породой g_2 .

6. На основании полученных данных вычисляют плотность минеральной части породы ρ_m (г/см³) по следующей формуле (с точностью до 0,001):

$$\rho_m = g / (g_1 + g - g_2).$$



Для каждой породы следует производить два параллельных определения и затем вычислять среднее значение с точностью до 0,01. Расхождение между результатами определений допускается до 0,02 г/см³.

7. Цифровые данные, получаемые в процессе определения плотности минеральной части пород, записывают в журнал (см. табл. III-2), а окончательные результаты — в сводную таблицу (приложение 3).

Плотность минеральной части засоленных пород. При определении плотности минеральной части засоленных горных пород применяют вместо дистиллированной воды керосин, а вместо кипячения — вакуумирование. Керосин должен быть обезвожен и профильтрован. Обезвоживание керосина производят путем взбалтывания его с силикагелем, который предварительно прокаливают в муфеле при 500 °С в течение 4 ч. Силикагель берут из расчета 250 г на 1 л керосина. Плотность керосина ρ_k устанавливают ареометром. Оборудование для определения плотности минеральной части засоленных пород необходимо такое же, как и для незасоленных.

Последовательность определения

1. Подготовку засоленных пород для определения плотности их минеральной части выполняют так, как указано выше. В результате получают массу сухой породы g . Затем пикнометр до половины наполняют керосином и для удаления воздуха из приготовленной жидкости производят вакуумирование с помощью вакуумного насоса. Степень разрежения при вакуумировании определяют по началу выделения пузырьков воздуха. Жидкость в пикнометре под вакуумом должна находиться до прекращения выделения пузырьков воздуха, но в общем не менее 1 ч.

2. После этого пикнометр доливают керосином до метки (уровень устанавливают по нижнему краю мениска), тщательно вытирают снаружи и взвешивают. Получают массу пикнометра с керосином и породой g_2 .

3. Керосин с породой выливают из пикнометра, пикнометр промывают керосином, вновь наполняют керосином до метки и взвешивают. Получают массу пикнометра с керосином g_1 . При всех взвешиваниях температура керосина должна быть постоянной (18, 20 или 22 °С).

4. Вычисление плотности минеральной части породы производят по формуле (с точностью до 0,001)

$$\rho_m = g\rho_k / (g_1 + g - g_2).$$

Для каждой пробы выполняют два параллельных определения, расхождение между которыми допустимо до 0,02 г/см³.

5. Данные, получаемые в процессе определения плотности минеральной части засоленных пород, записывают в журнал (см. табл. III-2).

§ 3. ПЛОТНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Метод непосредственных измерений

Плотностью горной породы принято называть ее массу в единице объема при естественном сложении и влажности. Численно она равна отношению массы породы к ее объему.

Определение плотности горных пород методом непосредственных измерений производят в тех случаях, когда представляется возможность вырезать образцы правильной геометрической формы. Для определения необходимо иметь: 1) весы технические; 2) линейку с делениями или штангенциркуль; 3) журнал (табл. III-3).

Последовательность определения

1. Из монолита горной породы вырезают, выпиливают или выбурируют образец правильной формы в виде куба, прямоугольного параллелепипеда или цилиндра.

2. Образец измеряют линейкой или штангенциркулем и вычисляют объем V .

3. Взвешивают образец на технических весах с точностью до 0,01 г и получают массу g .

4. Вычисляют плотность горной породы ρ (г/см³) по формуле

$$\rho = g/V.$$

Таблица III-3. Журнал для определения плотности горных пород методом непосредственных измерений

Лабораторный номер	Дата	Размер образца, см			Объем образца, см ³	Масса образца, г	Плотность, г/см ³		Примечание
		Длина или диаметр	Ширина	Высота			отдельного образца	средняя	

Рис. III-2. Номограмма
В. А. Приклонского для
вычисления плотности
скелета горной породы
 $\rho_{ск}$ по плотности ρ и
влажности W .

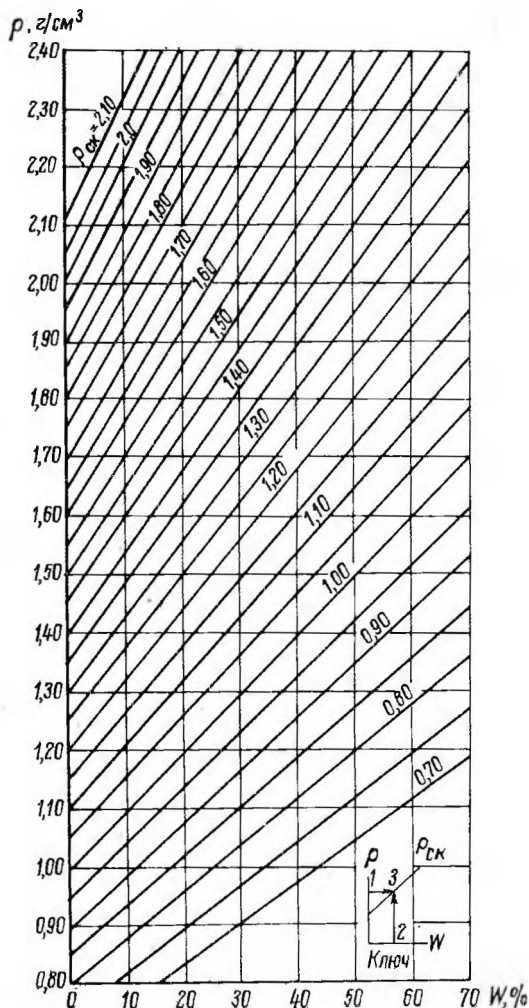
Для каждой пробы горной породы следует производить два параллельных определения, а затем вычислять среднее значение с точностью до 0,01. Расхождение результатов между параллельными определениями допускается в пределах до 0,02 г/см³.

Определив плотность и зная влажность горной породы, легко установить по номограмме В. А. Приклонского (рис. III-2) плотность ее скелета.

5. Все данные измерений и вычислений записывают в журнал (см. табл. III-3) и сводную таблицу (приложение 3).

Метод режущего кольца

Этот метод определения плотности применим для мягких горных пород — глин, суглинков, супесей, песков, из которых можно вырезать образец режущим кольцом (ГОСТ 5180—84). При использовании этого метода необходимо иметь: 1) кольцо из некорродирующего металла с заостренным режущим краем, диаметром не менее 50—70 мм, высотой не более диаметра и не менее половины диаметра, с толщиной стенок 1,5—2 мм; 2) штангенциркуль; 3) нож; 4) весы технические; 5) журнал (табл. III-4).



Последовательность определения

1. Измеряют при помощи штангенциркуля внутренний диаметр и высоту режущего кольца и вычисляют его объем V . Взвешивают кольцо на технических весах с точностью до 0,01 г и получают массу g_1 .

2. Кольцо ставят заостренной стороной на зачищенную и выровненную поверхность монолита горной породы. Остро отточенным ножом тонкими срезами вырезают столбик горной породы диаметром на 1 мм больше внутреннего диаметра кольца. По мере вырезывания кольцо постепенно надевают на столбик горной породы. Лишняя часть породы срезается при этом острыми краями кольца. При надевании кольца на столбик породы не следует допускать выкрошивания породы из боковых поверхностей столбика. Загрузка кольца простым задавливанием его в монолит нежелательна, так как это нарушает естественное сложение породы и не обеспечивает плотного заполнения кольца. После того как столбик породы выступит над краем кольца, лишнюю часть породы срезают вровень с нижним и верхним его краями.

3. Кольцо с породой взвешивают на технических весах и получают массу g_2 . Определив чистую массу породы $g = g_2 - g_1$, вычисляют ее плотность ρ (г/см³):

$$\rho = g/V.$$

Для каждой пробы горных пород следует производить два параллельных определения и затем вычислять среднее значение плотности с точностью до 0,01. Расхождение результатов между параллельными определениями не должно превышать 0,02 г/см³.

4. Цифровые данные записывают в журнал (см. табл. III-4), а окончательные результаты заносят в сводную таблицу (приложение 3).

Метод гидростатического взвешивания

[Этот метод определения плотности горных пород наиболее точный, он может применяться в тех случаях, когда не представляется возможным вырезать образцы геометрически правильной формы (ГОСТ 5180—84). Для определения плотности горных пород этим методом необходимо иметь: 1) весы технические; 2) весы технические, приспособленные для взвешивания образца породы в воде (рис. III-3), или специальные гидростатические весы (рис. III-4); 3) парафин; 4) нож; 5) нитки и фильтровальную бумагу; 6) журнал (табл. III-5).

Т а б л и ц а III-4. Журнал для определения плотности горных пород методом режущего кольца

Лабораторный номер	Дата	Масса кольца, г		Масса образца породы, г	Объем кольца, см ³	Плотность, г/см ³		Примечание
		пустого	с породой			отдельного образца	средняя	

Последовательность определения

1. Вырезают из монолита образец горной породы по возможности правильной овальной формы не менее 30 см³. Если породы либо твердые скальные или полускальные, либо содержат включения гальки, щебня, либо мерзлые, образец может иметь неправильную форму. Его взвешивают на технических весах с точностью до 0,01, получают массу g .

2. Образец породы обвязывают ниткой и погружают в расплавленный парафин (температура около 70 °С), чтобы покрыть его тонким слоем парафина. Пузырьки воздуха на парафиновой оболочке прокалывают нагретой иглой и заглаживают.

3. Запарафинированный образец взвешивают на технических весах, получают массу g_1 .

4. Определяют объем запарафинированного образца V_1 по потере его веса при погружении в воду. Для этого запарафини-

Т а б л и ц а III-5. Журнал для определения плотности горных пород методом гидростатического взвешивания

Лабораторный номер	Дата	Масса образца, г			Масса парафина, г	Объем, см ³			Плотность, г/см ³		Примечание
		без парафина	с парафином	в воде		парафина	запарафинированного образца	образца	отдельного образца	средняя	

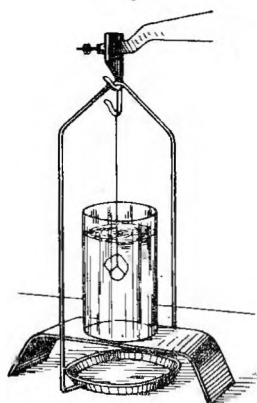


Рис. III-3. Подставка к техническим весам для взвешивания в воде.

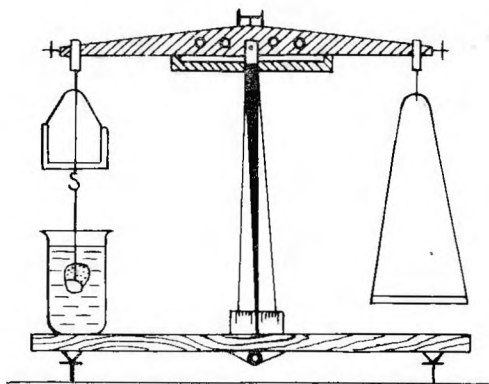


Рис. III-4. Весы для гидростатического взвешивания в воде.

рованный образец породы взвешивают в воде на обычных технических весах или на гидростатических весах (см. рис. III-3 и III-4).

5. Определив объем запарафинированного образца V_1 , его вынимают из воды, просушивают фильтровальной бумагой и взвешивают на воздухе для того, чтобы проверить, не проникла ли вода в поры породы. В случае увеличения массы образца по сравнению с первоначальной (п. 3) разность в массах следует отнести к массе вытесненной воды.

6. Определяют массу парафина g_2 , пошедшего на парафинирование образца, по разности $g_2 = g_1 - g$; затем находят объем парафина V_2 , зная, что плотность парафина $\rho_n = 0,9$:

$$V_2 = g_2 / \rho_n;$$

определяют объем образца V без парафина, т. е.

$$V = V_1 - V_2,$$

и затем вычисляют плотность горной породы ρ (г/см³):

$$\rho = \frac{g}{V}.$$

Для каждой пробы породы следует производить два параллельных определения. Расхождения в параллельных определениях допускаются до 0,02 г/см³.

7. Для очень плотных скальных и некоторых полускальных горных пород, пористость которых мала (доли процента или

1—2 %), плотность можно определять без парафинирования по формуле

$$\rho = g/V.$$

Цифровые данные определений плотности горных пород методом гидростатического взвешивания записывают в журнал (см. табл. III-5), а окончательные результаты — в сводную таблицу (приложение 3) и на перфокарту (приложение 4).

Определение плотности скальных и полускальных горных пород с помощью денситометра

Для плотных скальных и полускальных горных пород, пористость которых мала (доли процента или 1—2 %), плотность можно определять без парафинирования с помощью специального прибора — денситометра (измеритель плотности).

Основной частью этого прибора (рис. III-5) является коромысло 1, которое вращается на оси в шариковых подшипниках. К правому плечу коромысла при помощи подвеса 5 подвешивают образец или чашку для образца 6. К левому плечу подвешивают чашку 10 с уравнивающим грузом. На коромысле жестко укреплен указатель 3 шкалы плотности прибора 2. В нерабочем состоянии коромысло фиксируется стопорным винтом 4. Плотность на этом приборе определяется с точностью до 0,01 г/см³. На площадке 8 штатива 9 крепится подъемный механизм 7 с сосудом для воды. При подготовке прибора к работе необходимо проверить балансировку коромысла. Нормально оно должно оставаться в безразличном равновесии при разных положениях стрелки. Балансировку производят перемещением гаск на коромысле, как и на обычных рычажных весах.

Последовательность определения

1. Образец горной породы массой от 50 до 300 г подвешивают на нитке к подвесу 5 правого плеча коромысла. На чашку 10 левого плеча коромысла кладут гири или дробь, чтобы указатель 3 установился на индекс «и» шкалы плотности.

2. Образец погружают в стакан с водой и по шкале 2 читают значение плотности горной породы с точностью до 0,01 г/см³. Если плотность породы определяется по запарафинированному образцу, следует вводить поправку на парафинирование, которую определяют по специальной номограмме (рис. III-6).

Для каждой пробы породы, как и при других методах, следует производить два параллельных определения. Данные записывают в журнал (табл. III-6).

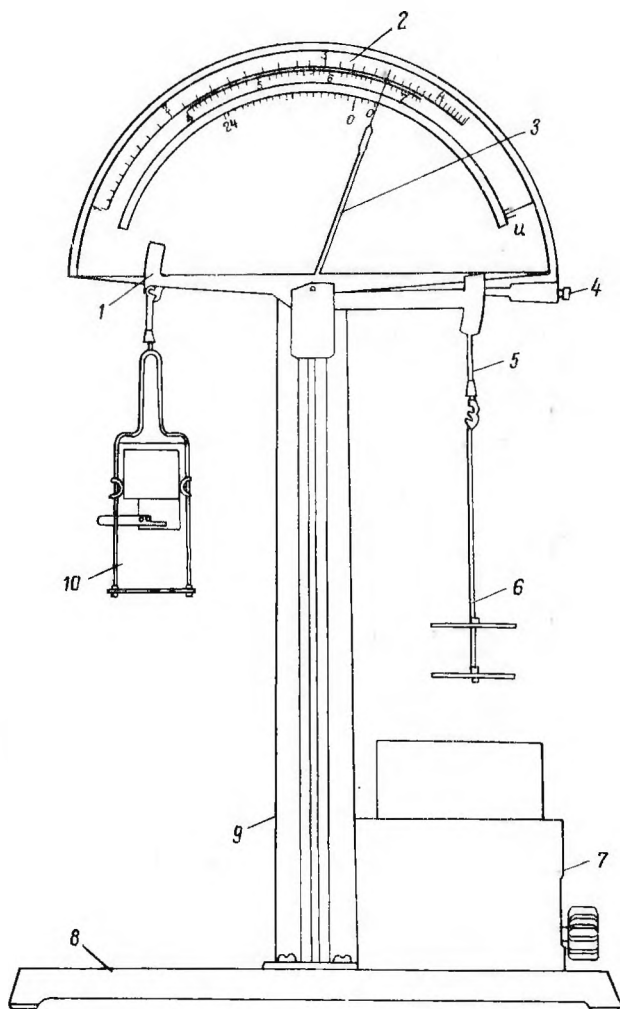


Рис. III-5. Денситометр.

Определение плотности песков при рыхлом и плотном сложении

Для оценки степени плотности сложения песков надо определять их плотность при рыхлом и плотном сложении и затем вычислять коэффициент I_a (см. табл. III-1). Для этих определений необходимо иметь специальный металлический стакан

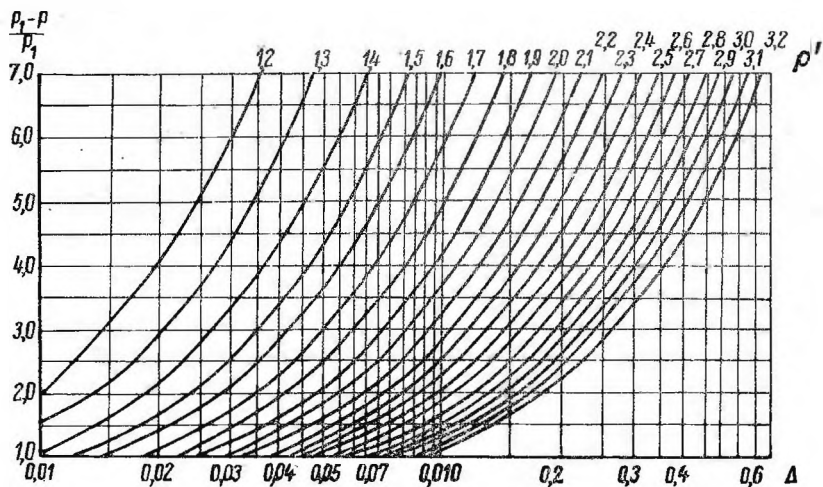


Рис. III-6. Номограмма для определения поправки на парафинирование при определении плотности горных пород.

ρ' — плотность образца с парафином, г/см³; P — масса образца в воздухе; P_1 — масса запарафинированного образца в воздухе; Δ — поправка.

диаметром 7—10 см и вместимостью 250—1000 см³ с насадкой высотой 2—2,5 см (рис. III-7), деревянную трамбовку с длинным носиком, металлическую линейку, технические весы, журнал (табл. III-7).

Последовательность определения

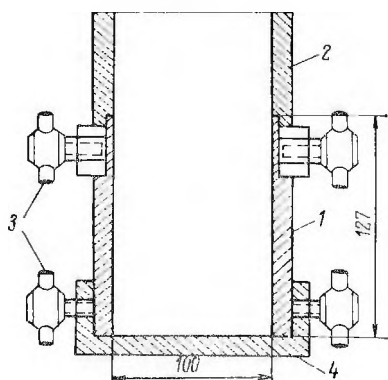
1. Металлический стакан взвешивают на технических весах, получают массу g_1 .
2. Песок высушивают до воздушно-сухого состояния и просеивают через сито с диаметром отверстий 5 мм; включения крупнее 5 мм удаляют.

Таблица III-6. Журнал для определения плотности горных пород на денситометре

Лабораторный номер	Дата	Плотность, г/см ³		Примечание
		отдельного образца	средняя	

Рис. III-7. стакан с насадкой для определения плотности песка.

1 — стакан; 2 — насадка; 3 — зажимные винты; 4 — съемное основание.



3. Наполняют стакан песком осторожно, небольшой струйкой через воронку, удлиненный носик которой поддерживают на высоте 1—2 см над дном стакана, а затем, по мере наполнения стакана, — над поверхностью песка. Стакан наполняют песком выше его края так, чтобы частично заполнить объем насадки. Затем

насадку снимают и избыток песка удаляют линейкой до уровня края стакана. Получают объем песка V , см³.

4. Стакан с песком взвешивают на технических весах для получения массы g_2 .

5. Вычисляют плотность песка рыхлого сложения $\rho_{\min}$ (г/см³):

$$\rho_{\min} = (g_2 - g_1)/V.$$

Опыт повторяют не менее двух раз, после чего вычисляют среднее арифметическое значение $\rho_{\min}$.

Таблица III-7. Журнал для определения плотности песков рыхлого и плотного сложения

Лабораторный номер	Дата	Рыхлое сложение						Плотное сложение							
		Масса стакана, г		Масса песка, г	Объем песка, см³	Плотность, г/см³		Масса стакана, г		Масса песка, г	Объем песка, см³	Плотность, г/см³			
		пустого	с песком			отдельной пробы	средняя	пустого	с песком			отдельной пробы	средняя		

6. Определяют плотность песка плотного сложения. При этом стакан наполняют песком небольшими порциями и уплотняют деревянной трамбовкой. Когда уровень песка в стакане будет выше его края, насадку снимают, а избыток песка удаляют линейкой до уровня края стакана. Получают объем уплотненного песка V (см³). Уплотнение песка в стакане производят до получения постоянной массы. Перед каждым контрольным взвешиванием насадку снимают, а излишек песка удаляют линейкой.

7. Стакан с песком взвешивают на технических весах и получают массу g_2 .

8. Вычисляют плотность песка плотного сложения ρ_{max} (г/см³):

$$\rho_{\text{max}} = (g_2 - g_1)/V.$$

Опыт повторяют, так же как и в предыдущем случае, не менее двух раз, после чего вычисляют среднее арифметическое значение ρ_{max} . Так как плотность песков при рыхлом и плотном сложении определяют на образцах воздушно-сухого состояния, то она практически получается равной плотности их скелета, т. е.

$$\rho_{\text{min}} = \rho_{\text{ск min}} \text{ и } \rho_{\text{max}} = \rho_{\text{ск max}}.$$

9. Все цифровые данные, получаемые при выполнении опытов, записывают в журнал (см. табл. III-7), а окончательные данные — в сводную таблицу (приложение 3).

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Метод расчета

Пористостью горных пород называют общий объем пор в единице объема породы. Общую пористость (в долях единицы или в процентах) в подавляющем большинстве случаев вычисляют по данным плотности минеральной части ρ_m и плотности скелета $\rho_{\text{ск}}$ по следующей формуле:

$$n = (\rho_m - \rho_{\text{ск}})/\rho_m = 1 - \rho_{\text{ск}}/\rho_m.$$

Соответственно коэффициент пористости равен

$$e = n/(1 - n) = (\rho_m - \rho_{\text{ск}})/\rho_{\text{ск}}.$$

Пористость и коэффициент пористости пород легко определить по номограмме В. А. Приклонского (рис. III-8).

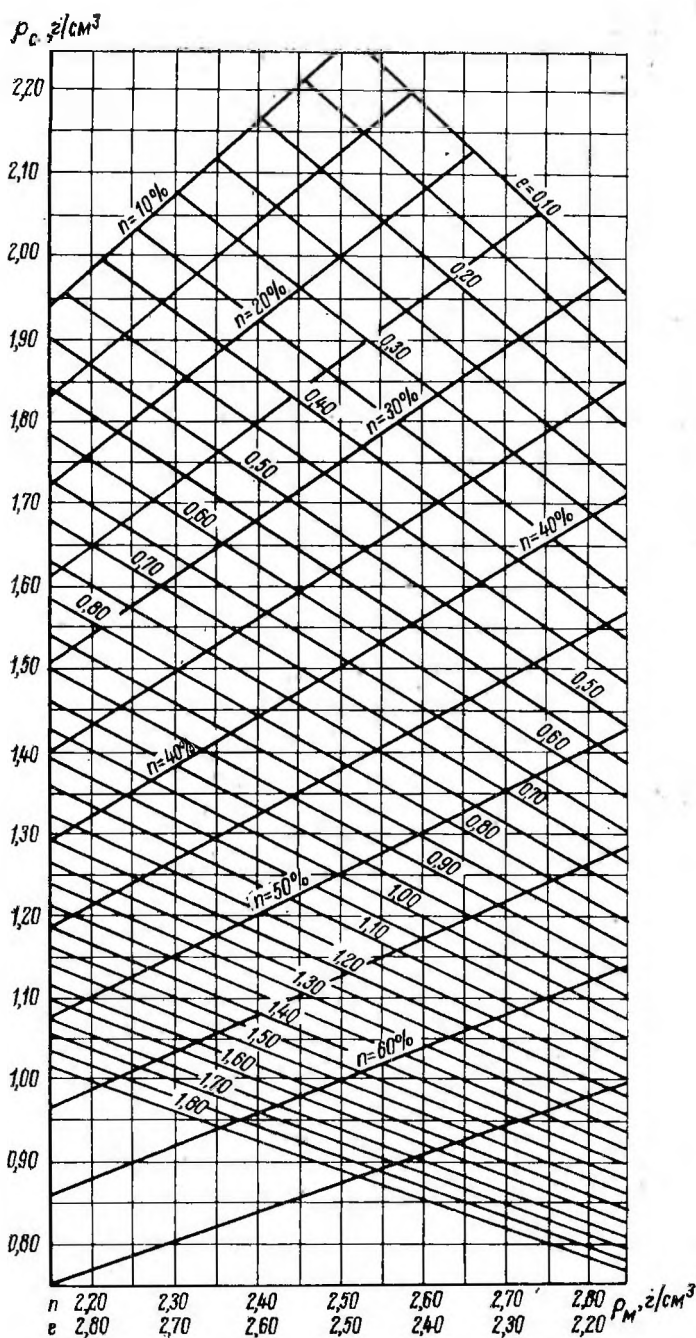


Рис. III-8. Номограмма В. А. Приклонского для вычисления пористости n и коэффициента пористости e горных пород по плотности минеральной части ρ_m и плотности скелета ρ_c .

Метод насыщения

Скальные и полускальные горные породы

Общую открытую пористость скальных и полускальных горных пород можно определять методом насыщения их какой-либо жидкостью. В качестве такой жидкости обычно используют чистый отфильтрованный керосин, так как он хорошо смачивает породы и легко проникает в поры. Кроме того, керосин почти нелетуч и не вызывает разрушения погружаемых в него слабоцементированных образцов. Все это обеспечивает достаточную точность определения открытой пористости горных пород. Оборудование для определения пористости этим методом необходимо то же, которое используется при определении плотности горных пород методом гидростатического взвешивания.

Последовательность определения

1. Образец горной породы объемом не менее 30 см³ высушивают в сушильном шкафу при температуре 100—105 °С до постоянной массы, взвешивают на технических весах с точностью до 0,01, получают массу g .

2. Высушенный образец обвязывают ниткой и погружают в керосин для насыщения. Для полного насыщения стакан с погруженным в керосин образцом помещают под вакуум на 30 мин — 1 ч. После насыщения образец взвешивают на гидростатических весах в керосине (см. рис. III-4), получают массу образца в керосине g_1 .

3. Образец вынимают из керосина, просушивают фильтровальной бумагой, взвешивают на воздухе, получают массу g_2 . Открытую пористость вычисляют по формуле

$$n_{\text{откр}} = (g_2 - g) / (g_2 - g_1).$$

Таблица III-8. Журнал для определения открытой пористости скальных и полускальных горных пород методом насыщения

Лабораторный номер	Дата	Масса образца, г			Пористость	
		сухого в воздухе	насыщенного в керосине	насыщенного в воздухе	отдельного образца	средняя

Следовательно, открытая пористость равна объему керосина, пошедшего на насыщение образца. Зная общую и открытую пористости, легко вычислить закрытую пористость. Для каждой пробы следует производить два параллельных определения пористости.

4. Все цифровые данные записывают в журнал (табл. III-8), а окончательные результаты — в сводную таблицу (приложение 3).

Рыхлые несвязные породы

Для непосредственного определения пористости песков и песчаных пород нарушенного сложения можно применять метод насыщения их водой. Для этого необходимо иметь: 1) стеклянный химический стакан с меткой, обозначающей объем $V = 200 \div 500 \text{ см}^3$; 2) бюретку, укрепленную на штативе; 3) технические весы; 4) журнал (табл. III-9).

Последовательность определения

1. Взвешивают стеклянный стакан на технических весах, получают массу g_1 .

2. Песок высушивают на воздухе и наполняют им стакан до метки при той плотности, при которой необходимо определить пористость. Получают объем песка $V \text{ (см}^3\text{)}$. Стакан с песком взвешивают, получают массу g_2 .

3. Стакан с песком ставят на штатив под бюретку, нижний конец которой погружают в песок так, чтобы он находился на высоте 2—3 мм над дном стакана.

Таблица III-9. Журнал для определения пористости рыхлых пород методом насыщения

Лабораторный номер	Дата	Масса, г					Объем воды, израсходованный на насыщение песка, см^3	Объем песка в стакане, см^3	Пористость, %	Плотность скелета, г/см^3	Плотность, г/см^3
		стакана пустого	стакана с сухим песком	стакана с песком, насыщенным водой	песка сухого	песка, насыщенного водой					

4. Бюретку наполняют водой до метки. Затем, периодически приоткрывая зажим у бюретки, начинают медленно насыщать песок до появления пленки воды на поверхности песка.

5. Поднимают бюретку по штативу, извлекают ее из песка. Если при этом пленка воды на поверхности исчезнет, в стакан дополняют воды до появления пленки. Затем берут отсчет по бюретке и записывают, сколько кубических сантиметров воды v пошло на насыщение песка.

6. Стакан с песком, насыщенным водой, взвешивают, получают массу g_3 . Увеличение массы (в граммах) должно быть примерно равно числу кубических сантиметров воды (v , см³), пошедшей на насыщение песка, отсчитанному по бюретке.

7. Вычисляют пористость песка, выражая ее в долях единицы или в процентах, по следующей формуле:

$$n = v/V.$$

Одновременно вычисляют отвечающие этой пористости показатели плотности песка $\rho_{\text{ск}}$ и ρ (г/см³) следующим образом:

$$\rho_{\text{ск}} = (g_2 - g_1)/V; \quad \rho = (g_3 - g_1)/V.$$

Для каждой пробы песка или песчаной породы следует производить два параллельных определения пористости для каждой плотности.

8. Все данные, полученные в процессе опыта, записывают в журнал (см. табл. III-9), а окончательные результаты — в сводную таблицу (приложение 3).

§ 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Общая влажность

Для определения влажности горных пород, в том числе естественной, необходимо иметь следующее оборудование (ГОСТ 5180—84): 1) технические весы; 2) бюксы стеклянные или алюминиевые; 3) эксикатор; 4) сушильный шкаф; 5) журнал (табл. III-10).

Последовательность определения

1. Бюкс с крышкой взвешивают на технических весах и получают массу g_1 .

2. Из середины пробы, доставленной в лабораторию, берут навеску горной породы не менее 15 г в ранее взвешенный бюкс, закрывают его крышкой и взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г, получают массу g_2 .

3. После взвешивания бюкс с приоткрытой крышкой ставят в сушильный шкаф для высушивания породы. Температура

Т а б л и ц а III-10. Журнал для определения влажности горной породы

Лабораторный номер	Дата	Номер бюкса	Масса бюкса, г				Масса, г		Влажность, %		Примечание
			пустого	с влажной породой	с сухой породой		выпаренной воды	сухой породы	отдельной пробы	средняя	
					1	2					

в нем должна быть равной 100—105 °С. Высушивание породы производят до постоянной массы, которую устанавливают периодическими взвешиваниями: первое взвешивание производят через 4—5 ч, второе и последующие через 1—2 ч. Перед каждым взвешиванием бюкс с породой, вынутый из сушильного шкафа, помещают в эксикатор для охлаждения. В результате взвешивания получают массу g_3 .

4. Разность масс породы до высушивания и после, отнесенная к массе абсолютно-сухой породы и умноженная на 100, составляет влажность в процентах.

Вычисление влажности породы производят с точностью до 0,1 %, с последующим округлением результата до 1 %, по формуле

$$W = [(g_2 - g_3) / (g_3 - g_1)] \cdot 100.$$

Для каждого образца производят два определения влажности. Расхождение между параллельными определениями допускается до 2 %. По двум определениям выводят среднее значение влажности породы с точностью 1 %. По влажности породы, плотности ее минеральной части и пористости с помощью номограммы, показанной на рис. III-9, легко устанавливается коэффициент насыщения ее водой.

5. Цифровые данные, полученные в процессе определения влажности породы, записывают в журнал (см. табл. III-10), а окончательный результат — в сводную таблицу (приложение 3).

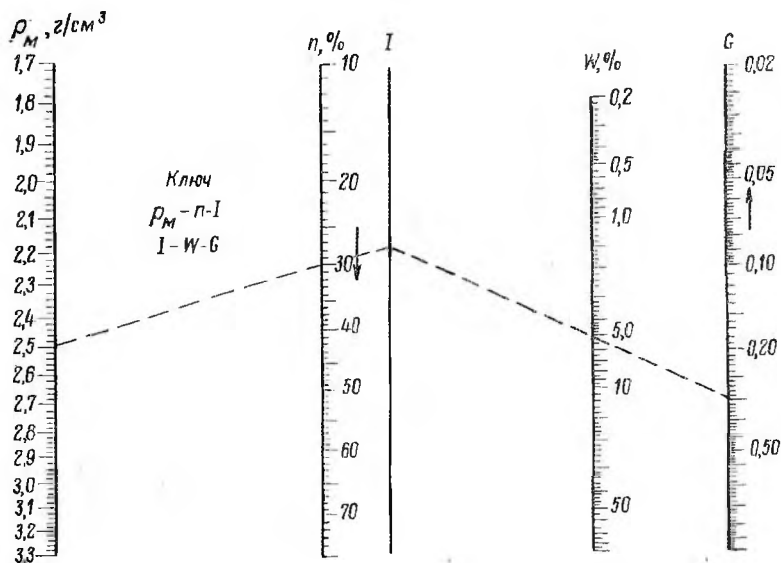


Рис. III-9. Номограмма для вычисления коэффициента насыщения горных пород водой G по их влажности W , плотности минеральной части ρ_m и пористости n .

Гигроскопическая влажность

Влажность горной породы, обусловленная ее гигроскопичностью, т. е. ее свойством сорбировать парообразную воду из воздуха, называется гигроскопической. Она практически равна влажности воздушно-сухой породы. Так как гигроскопичность горных пород зависит от степени их дисперсности, минерального состава и других факторов, то определение гигроскопической влажности представляет практический интерес только для пород глинистых и отчасти для песков тонко- и мелкозернистых (ГОСТ 5180—84). Гигроскопическая влажность определяет содержание адсорбированной воды в горной породе в данных условиях.

Для определения гигроскопической влажности необходимо то же оборудование, что и для определения влажности горных пород. В тех случаях, когда проба породы мала и навеску приходится брать небольшую (5 г), ее взвешивают на аналитических весах. Кроме того, при определении гигроскопической влажности следует пользоваться только стеклянными бюксами.

Последовательность определения

1. Пробу породы высушивают на воздухе в течение 1—2 сут, затем растирают ее в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником, чтобы разрушить крупные кусочки и агрегаты, и образовавшийся мелкозем просеивают через сито с диаметром отверстий 0,5 мм.

2. Стекланный бюкс с крышкой взвешивают на технических или аналитических весах и получают массу g_1 .

3. Из просеянной части пробы берут среднюю пробу квартованием (см. гл. II, § 4, п. 3). Из средней пробы берут навеску не менее 5 г (при взвешивании на аналитических весах) или не менее 15 г (при взвешивании на технических весах) в заранее взвешенный бюкс, закрывают его крышкой и взвешивают с точностью в зависимости от применяемых весов соответственно до 0,01 или до 0,001 г и получают массу g_2 .

4. Дальше продолжают анализ, как при обычном определении влажности горной породы (см. § 5, пункты 3, 4, 5).

Вычисление гигроскопической влажности производят с точностью до 0,1 %.

Максимальная гигроскопическая влажность

Максимальную гигроскопическую влажность горные породы приобретают путем поглощения (сорбции) влаги из воздуха, почти полностью насыщенного водяным паром (относительная влажность 95—98 %). Эта влажность близка или практически равна максимально возможному содержанию физически связанной, адсорбированной воды в породе. Для определения такой влажности обычно применяют метод Митчерлиха, основанный на установлении равновесного состояния влажности породы в воздухе, почти полностью насыщенном водяным паром, при температуре 20 °C. При этом кроме оборудования, необходимого для определения гигроскопической влажности горных пород, надо дополнительно иметь еще один эксикатор, в нижней части которого налит слой 10 %-ного раствора H_2SO_4 или насыщенный раствор K_2SO_4 .

Последовательность определения

1. Глинистую породу или песок подготавливают к анализу так же, как при определении гигроскопической влажности в соответствии с пунктами 1 и 2.

2. Из просеянной части пробы берут среднюю пробу квартованием. Из средней пробы берут навеску не менее 5 г (при взвешивании на аналитических весах) или не менее 15 г (при взвешивании на технических весах) в заранее взвешенный бюкс.

3. Бюкс с приоткрытой крышкой помещают в эксикатор, в котором находится раствор H_2SO_4 или K_2SO_4 . Эксикатор накрывают крышкой, и бюкс с породой оставляют в нем на 1—2 сут для установления равновесного состояния влажности породы в атмосфере, насыщенную водяным паром. Полагается эксикатор держать в комнате при температуре около $20^\circ C$. В этом случае относительная влажность воздуха в эксикаторе над указанными растворами достигает 95—98 %. Равновесное состояние влажности породы фиксируют периодическим взвешиванием бюкса на технических или аналитических весах. Получают массу g_2 .

4. Затем бюкс с приоткрытой крышкой ставят в сушильный шкаф для высушивания породы при температуре $100—105^\circ C$ до постоянной массы. В результате взвешивания получают массу g_3 .

Максимальную гигроскопическую влажность породы вычисляют с точностью до 0,1 % по формуле

$$W = (g_2 - g_3) / (g_3 - g_1).$$

§ 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ПЛАСТИЧНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Глинистые породы под действием внешних усилий — нагрузки одинаковой стандартной величины, но при разной влажности — могут быть текучими, пластичными или твердыми. Характерные значения влажности, при которых изменяется консистенция — физическое состояние глинистых пород, принято называть пределами пластичности. Наиболее важными из них являются предел текучести и предел пластичности. Определение этих пределов обычно производят по образцам глинистых пород нарушенного сложения. Поэтому они имеют явно условный характер и позволяют в большинстве случаев только грубо приближенно характеризовать и оценивать физическое состояние глинистых пород четвертичного возраста, т. е. пород, не претерпевших значительных изменений при литификации. Однако простота и доступность методов определения пределов пластичности позволяют широко ими пользоваться для предварительной характеристики и оценки консистенции глинистых пород на разных стадиях инженерных изысканий.

Предел текучести

Стандартный метод

Стандартный метод определения предела текучести (ГОСТ 5180—84) применяется для мягких несцементированных глинистых пород, состоящих преимущественно из частиц размером

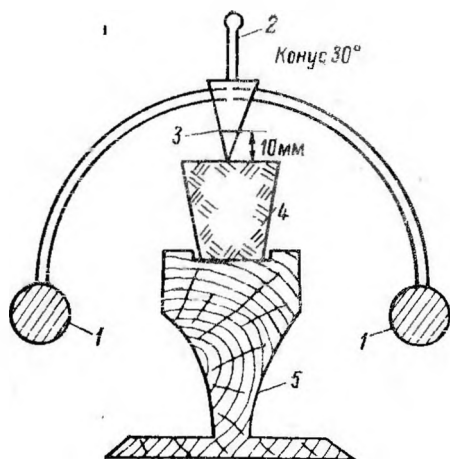


Рис. III-10. Балансирный конус для определения предела текучести глинистых пород стандартным методом.

1 — балансирный конус; 2 — ручка; 3 — круговая метка; 4 — стаканчик с подготовленной для испытания породой; 5 — подставка.

менее 1 мм. Этот метод неприменим для глинистых пород, которые содержат значительное количество растительных остатков (почвы, заторфованные породы, торф). Согласно этому методу за предел текучести принимается влажность глинистой породы на-

рушенного сложения, при которой специальный балансирный конус (рис. III-10) массой 76 г под действием собственного веса погружается в нее на 10 мм. В этом случае предельная прочность породы, выраженная через удельное сопротивление пенетрации, $R_{пв} = 0,076 \text{ кг/см}^2$ ($0,0076 \text{ МПа} = 7,6 \text{ кПа}$).

Для определения предела текучести стандартным методом необходимо иметь: 1) стандартный балансирный конус; 2) стаканчик диаметром не менее 4 см и высотой не менее 2 см; 3) весы технические; 4) бюксы стеклянные или алюминиевые; 5) эксикатор; 6) сушильный шкаф; 7) сито с диаметром отверстий 1 мм; 8) ступку с резиновым пестиком; 9) чашку фарфоровую диаметром 10—15 см; 10) шпатель; 11) журнал (табл. III-11).

Балансирный полированный конус изготавливается из нержавеющей стали или латуни с углом при вершине 30° и высотой 25 мм. На расстоянии 10 мм от вершины на конусе вырезана круговая метка. Балансирное устройство состоит из двух металлических шаров, укрепленных на концах проволочного прута, согнутого в полуокружность и проходящего внутри верхней части конуса. Общая масса конуса 76 г (с погрешностью $\pm 0,2 \text{ г}$). Для испытания породы необходима специальная подставка.

Последовательность определения

1. Предел текучести по возможности следует определять только по образцам естественной влажности. Берут кусок породы массой примерно 100 г, разминают шпателем, одновременно удаляя крупные включения, в том числе растительные остатки, и затем протирают через сито с диаметром отверстий 1 мм. Если природная влажность породы мала, породу предва-

Т а б л и ц а III-11. Журнал для определения пределов пластичности глинистой породы

[illegible]

рительно растирают в фарфоровой ступке резиновым пестиком, удаляя при этом крупные включения, и пропускают через сито с отверстиями 1 мм.

2. Породу помещают в фарфоровую чашку, замачивают ее дистиллированной водой, если она имеет незначительную влажность, тщательно размешивают шпателем до образования однородной сравнительно густой массы и оставляют на сутки для размокания. Чтобы порода в чашке не высохла, ее помещают в эксикатор с водой.

Такая подготовка породы для определения предела текучести в настоящее время принята как стандартная. Если влажность породы достаточно высокая, к определению предела текучести приступают сразу после указанной выше подготовки породы к испытанию. Если в лабораторию доставлены образцы породы, не сохранившие естественную влажность (сухие), то подготовка их к испытанию должна быть такой же, как и природно-сухих пород.

3. Подготовленную массу породы после размокания еще раз тщательно перемешивают и переносят в стаканчик прибора ровень с его краями. Поверхность породы заглаживают шпателем.

4. На поверхность породы устанавливают конус, предварительно смазав его тонким слоем вазелина, который погружается в породу под влиянием собственного веса. Если конус за 5 с погрузится в породу на глубину 10 мм, считается, что влажность ее равна пределу текучести.

5. Если конус за 5 с погружается в породу на глубину менее 10 мм, то влажность ее ниже предела текучести. В этом случае породу перекладывают из стаканчика обратно в фарфоровую чашку, добавляют немного воды, тщательно перемешивают, затем наполняют стаканчик и повторяют испытание. Если конус за 5 с погружается на глубину более 10 мм, это указывает на избыток воды в породе. В этом случае породу подсушивают на воздухе, непрерывно или часто перемешивая шпателем. После подсушивания повторяют испытание.

6. Когда требуемая консистенция породы будет достигнута, из стаканчика берут навеску породы (не менее 15 г) в заранее взвешенный бюкс и определяют ее влажность (см. § 5), которая соответствует пределу текучести. Для каждой пробы производят не менее двух параллельных определений. Расхождения в результатах параллельных определений влажности более 2 % не допускаются. По двум определениям устанавливают значение влажности породы с точностью 1 %, которое и принимается равным пределу текучести.

7. Цифровые данные записывают в журнал (см. табл. III-11), а окончательный результат заносят в сводную таблицу (приложение 3).

Подготовка глинистой породы к испытаниям для определения предела текучести методами А. М. Васильева и А. Казагранде полностью сохраняется такой, как и при описанном выше стандартном методе. Определение предела текучести этими методами производят на специальных приборах. Следует заметить, что прибором А. М. Васильева в настоящее время пользуются редко, но испытания на этом приборе соответствуют испытаниям по международному методу, основанному на применении прибора А. Казагранде. Важно также учитывать, что балансирный конус, применяемый при стандартном методе, тарировался по пределу текучести, определяемому на приборах В. В. Охотина, А. М. Васильева и А. Казагранде.

Для определения предела текучести методами Васильева и Казагранде кроме оборудования, используемого при стандартном методе, необходимо иметь прибор Васильева или прибор Казагранде. Прибор Васильева изображен на рис. III-11. На штативе 1 вертикально установлен стержень 5, в верхней части которого укреплен деревянный диск 2. Этот диск имеет сферическое углубление для установки латунной чашки 3, которая закрепляется резинкой 4. На столике штатива наклеен лист вулканизированной резины 7 толщиной 2 мм, на котором лежит стальной диск толщиной 5 мм. Стержень 5 можно поднимать вверх и опускать для свободного падения на площадку штатива. Высота падения стержня для определения предела текучести должна быть равна 75 мм. Для этого на стержне поставлен ограничитель 6. При падении стержень ударяется о площадку штатива и происходит встряхивание грунтовой массы в чашке.

Прибор Казагранде показан на рис. III-12. Он состоит из латунной чашки 1, прикрепленной к железному бруску 2, подвешенному на каретке 3. Каретка имеет ось 4, на которой закреплены эксцентрик 5 и ручка 6. Каретка смонтирована на деревянной площадке 7, на которой под чашкой положен лист резины. При вращении ручки эксцентрик задевает брусок 2 и тем самым поднимает чашку на высоту 1 см, а затем сбрасывает ее на резиновую подкладку. При падении чашка ударяется и происходит встряхивание в ней грунтовой массы.

Последовательность определения

1. Глинистую породу подготавливают к испытаниям для определения предела текучести, как при стандартном методе.

2. Подготовленную массу породы после размочения еще раз тщательно перемешивают и перекладывают в чашку одного из рассматриваемых приборов, где разравнивают слоем толщиной

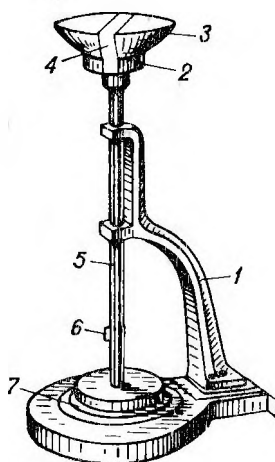


Рис. III-11. Прибор А. М. Васильева для определения предела текучести глинистых пород.

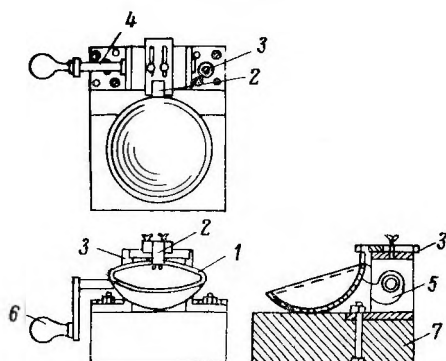


Рис. III-12. Прибор А. Казагранде для определения предела текучести глинистых пород.

в 1 см. Затем породу разрезают V-образным шпателем на две части так, чтобы между ними образовалась щель шириной 1,5—2 мм в основании и 10—12 мм на поверхности.

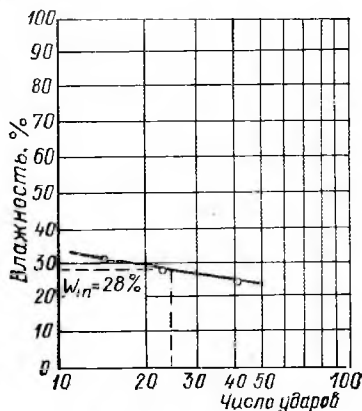
3. При работе с прибором Васильева чашку с породой устанавливают на деревянном диске и закрепляют резинкой 4. Прибор помещают на жесткое основание, поднимают стержень прибора до стопора и опускают для свободного падения. Испытание считается законченным, если после третьего удара стержня обе части породы сольются и заполнят разрез на высоту 1 мм и длину 1,25—2,6 см. Если это не будет достигнуто, опыт необходимо повторить и продолжить, как и при стандартном методе.

4. При работе с прибором Казагранде, после того как слой породы разрезан V-образным шпателем на две части, прибор помещают на жесткое основание и вращают ручку прибора со скоростью двух оборотов в секунду до тех пор, пока при встряхивании чашки обе части породы не сольются и заполнят разрез на высоту 1 мм и длину 1,25—2,6 см. При этом записывают число ударов, после которых обе части породы слились. Из места слияния породы берут пробу для определения влажности. Опыт повторяют три раза при разных влажностях породы. Влажность подбирают таким образом, чтобы среднее число ударов при первом опыте составляло от 10 до 20, при втором от 20 до 30 и при третьем от 30 до 45—50. По полученным данным строят график, показанный на рис. III-13. Влажность, соответствующую на графике 25 ударам, принимают равной пределу текучести породы.

Рис. III-13. График для определения предела текучести глинистой породы по методу А. Казагранде.

Предел пластичности

Стандартным методом определения предела пластичности глинистых пород является метод раскатывания породы в шнур. При определении предела пластичности этим методом обычно используют массу породы, оставшуюся в чашке после определения предела текучести. Для определения предела пластичности необходимо дополнительно иметь стекло размером 10×15 или 15×20 см.



Последовательность определения

1. Глинистую породу доводят до пластичного состояния, перемывая ее в руках и подсушивая на воздухе.

2. Берут часть приготовленной породы и раскатывают ее на стекле в шнур диаметром 3 мм; затем глинистый шнур собирают в комок и вновь раскатывают до тех пор, пока шнур из глинистой породы диаметром 3 мм не станет покрываться трещинами и крошиться на кусочки длиной 3—10 мм. Такое состояние породы указывает на то, что ее предел пластичности достигнут (рис. III-14). Если из приготовленного глинистого теста невозможно раскатать шнур диаметром 3 мм (порода рассыпается), то считают, что данная порода не имеет границы раскатывания, т. е. она не обладает пластичностью.

3. Набрав 10—15 г крошек — кусочков породы, определяют ее влажность, которая и будет соответствовать пределу ее пластичности.

4. Для каждой пробы породы рекомендуется производить два параллельных определения. Расхождения между параллельными определениями влажности более 2 % не допускаются. По двум определениям выводят среднее значение с точностью до 1 %.

5. Результаты определений записывают в журнал (см. табл. III-11) и в сводную таблицу (приложение 3).

Число пластичности

Число пластичности глинистой породы определяют по разности между влажностями, соответствующими пределу текучести и пределу пластичности:

$$I_p = W_T - W_p.$$

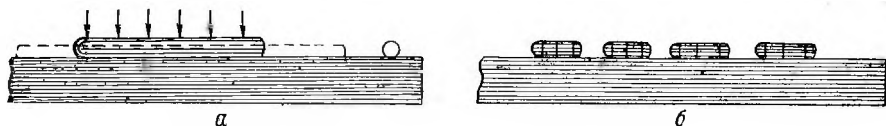


Рис. III-14. Определение предела пластичности глинистой породы.

а — порода раскатывается в шнур при влажности выше предела пластичности; *б* — порода, раскатываемая в проволоку, покрывается трещинами и крошится при пределе пластичности.

§ 7. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ПЕСКОВ

Для определения относительной плотности песков принято сравнивать плотность их сложения в условиях естественного залегания с плотностями, соответствующими их наиболее рыхлому и наиболее плотному сложению. Для такого сравнения необходимо знать:

- 1) коэффициент пористости и пористость песка, соответствующие его естественным условиям залегания, т. е. e и n ;
- 2) коэффициент пористости и пористость песка, соответствующие его наиболее рыхлому сложению, т. е. $e_{\max}$ и $n_{\max}$;
- 3) коэффициент пористости и пористость песка, соответствующие его наиболее плотному сложению, т. е. $e_{\min}$ и $n_{\min}$.

Коэффициент пористости и пористость песка, соответствующие условиям его естественного залегания, определяют по формулам

$$e = (\rho_m - \rho_{ск}) / \rho_{ск}; \quad n = 1 - \rho_{ск} / \rho_m.$$

Плотность минеральной части породы ρ_m определяется экспериментально, плотность скелета породы $\rho_{ск}$ вычисляется по формуле

$$\rho_{ск} = \rho / (1 + 0,01W),$$

где влажность породы W и ее плотность ρ определяются также экспериментально (см. § 3 и 5).

Коэффициент пористости и пористость песка, соответствующие наиболее рыхлому и наиболее плотному сложению, определяются по следующим формулам:

$$e_{\max} = (\rho_m - \rho_{ск \min}) / \rho_{ск \min}; \quad n_{\max} = 1 - \rho_{ск \min} / \rho_m;$$

$$e_{\min} = (\rho_m - \rho_{ск \max}) / \rho_{ск \max}; \quad n_{\min} = 1 - \rho_{ск \max} / \rho_m.$$

Методика определения $\rho_{ск \max}$ и $\rho_{ск \min}$ для песков изложена в § 8.

Таким образом, определив плотность скелета песка при рыхлом $\rho_{ск \min}$ и плотном $\rho_{ск \max}$ его сложении, можно подсчитать соответствующие значения $e_{\max}$, $e_{\min}$ или $n_{\max}$ и $n_{\min}$, а также, зная e и n для условий естественного сложения, можно вычис-

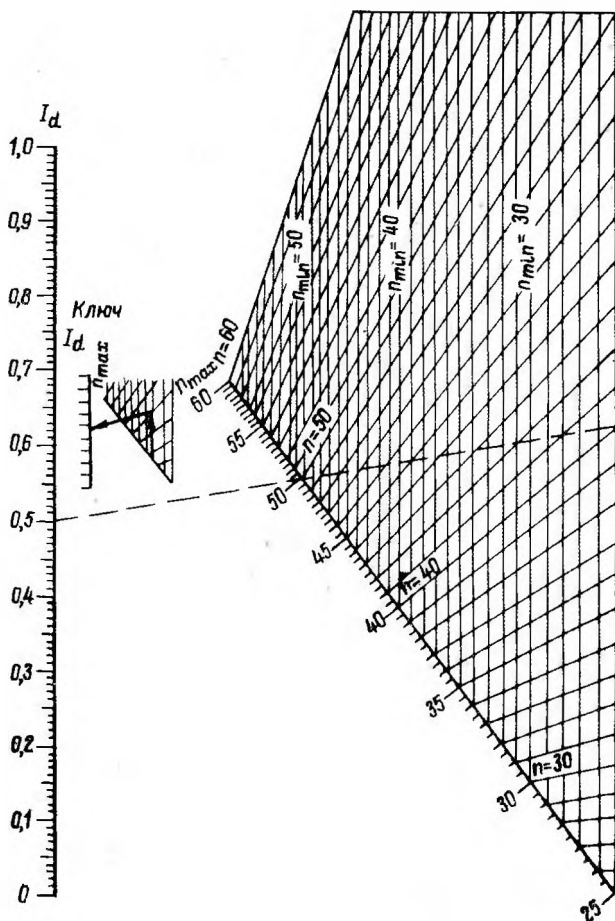


Рис. III-15. Номограмма для вычисления коэффициента относительной плотности песка.

литель коэффициент относительной плотности песка I_d и оценить плотность его сложения (см. § 1).

Для вычисления коэффициента относительной плотности песка можно также пользоваться специальной номограммой (рис. III-15).

§ 8. ОПТИМАЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ И МАКСИМАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

При проектировании и строительстве земляных сооружений из песчаных и глинистых пород необходимо обеспечить наибольшую их устойчивость и прочность. Это достигается уплотне-

нием пород (укаткой, трамбованием, виброуплотнением) до максимальной плотности при оптимальной влажности.

Наибольшая плотность породы (характеризуемая плотностью скелета), получаемая при затрате стандартной или рациональной работы на ее уплотнение, называется максимальной $\rho_{ск\ max}$. Влажность породы, соответствующая максимальной плотности, называется оптимальной $W_{опт}$.

Для определения оптимальной влажности и максимальной плотности песчаных и глинистых пород необходимо следующее оборудование: 1) прибор для стандартного уплотнения пород; 2) весы технические; 3) сито с отверстиями 5 мм; 4) чашка фарфоровая; 5) ступка с пестиком; 6) мерный цилиндр; 7) бюксы; 8) журнал (табл. III-12).

Прибор для стандартного уплотнения пород (рис. III-16) состоит из цилиндра 2, изготовленного из нержавеющей металла, с внутренним диаметром 100 мм, высотой 127 мм и общим объемом $V=1000\text{ см}^3$, съемного основания 1 и съемной кольцевой насадки 4. Уплотнение породы в цилиндре производится ударами гири 5 массой 2,5 кг, падающей с высоты 30 см на штамп-уплотнитель 3. Последний имеет стойку 6 с ограничителем 7, ограничивающим высоту подъема гири.

Последовательность определения

1. В фарфоровую чашку отвешивают среднюю пробу воздушно-сухой породы в количестве 2,5—3 кг, предварительно растертой в ступке (если порода состоит из комков) и просеянной через сито с отверстиями 5 мм. В породу добавляют воду (см^3): в песок 80, в супесь 100, в суглинок 200 и в глину 250. Породу тщательно перемешивают для равномерного увлажнения и затем берут пробу для определения ее влажности.

Т а б л и ц а III-12. Журнал для определения оптимальной влажности и максимальной плотности песчаных и глинистых пород

Лабораторный номер	Дата			
Показатели	1-е определение	2-е определение	3-е определение	4-е определение
Масса цилиндра с основанием и уплотненной породой g_2 Масса цилиндра с основанием g_1 Масса уплотненной породы g Плотность уплотненной породы ρ , г/см^3 Влажность уплотненной породы W , % Плотность скелета уплотненной породы $\rho_{ск}$, г/см^3				

Рис. III-16. Прибор ДорНИИ для стандартного уплотнения песчаных и глинистых пород.

2. Определяют массу цилиндра с основанием g_1 , затем устанавливают на цилиндр насадку и наполняют его породой. Цилиндр заполняют породой в три приема, каждый раз примерно на одну треть его высоты. Каждый слой породы уплотняют ударами гири. Число ударов гири по каждому слою равно одной трети общего числа ударов. При стандартном уплотнении общее число ударов гири принимается: для песков 60, для супесей 75 и для суглинков и глин 120.

3. После уплотнения снимают с цилиндра насадку; избыток породы срезают ножом вровень с краями цилиндра. Цилиндр с основанием и уплотненной породой взвешивают с точностью до 1 г (g_2) и определяют плотность влажной уплотненной породы по формуле

$$\rho = (g_2 - g_1) / V.$$

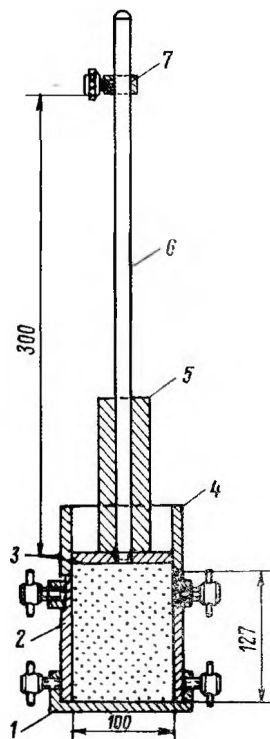
Одновременно из цилиндра берут пробу породы для определения ее влажности.

4. Оставшуюся в цилиндре часть породы перегружают обратно в фарфоровую чашку, где находится не использованная в данном опыте часть породы. Затем в породу доливают воду в таком количестве, чтобы увеличить ее влажность примерно на 2—3 %, и тщательно перемешивают. Обычно на 3 кг породы достаточно добавить 50—70 см³ воды. Более точно объем доливаемой воды V_v можно определить по формуле

$$V_v = [g / (1 + W_n)] (W - W_n),$$

где g — масса первоначально влажной породы, г; W — влажность породы, которую необходимо получить, %; W_n — начальная влажность породы, %.

5. Перемешав тщательно породу, берут пробу на влажность и вновь производят испытание на уплотнение в приборе, но при более высокой влажности. Так повторяют испытания породы несколько раз при все более высоких влажностях (через каждые 2—3 %) до тех пор, пока плотность влажной породы не станет уменьшаться.



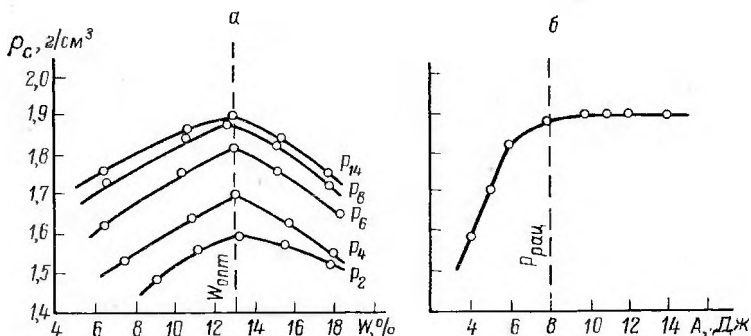


Рис. III-17. Графики зависимости изменения плотности породы от ее влажности при уплотнении (а) и от затраченной работы (б).

6. После окончания серии испытаний вычисляют значение плотности скелета породы для каждого опыта по формуле

$$\rho_{\text{ск}} = \rho / (1 + 0,01W).$$

7. На основании данных, полученных в результате испытаний, составляют график зависимости изменения плотности породы от ее влажности и от затраченной работы (рис. III-17). За оптимальную влажность принимают такую, при которой получилась максимальная плотность.

8. Все результаты испытаний заносят в журнал (см. табл. III-12).

Контрольные вопросы

1. Какие основные физические свойства горных пород учитывают при их инженерно-геологическом изучении и оценке?
2. В чем сущность пикнометрического метода определения плотности минеральной части горных пород?
3. В чем состоят особенности определения плотности минеральной части засоленных горных пород?
4. Методы определения плотности горных пород.
5. Опишите устройство денситометра и его назначение.
6. Примерные значения плотности и плотности скелета наиболее типичных разностей горных пород.
7. Методы определения пористости различных горных пород.
8. Как определяются влажность и естественная влажность горных пород?
9. Методика определения гигроскопической влажности и максимальной гигроскопической влажности горных пород.
10. Определение предела текучести глинистых пород стандартным методом.
11. Метод определения предела пластичности глинистых пород.
12. Что такое относительная плотность песков и как она определяется?
13. Какую влажность называют оптимальной и как она определяется?
14. Определение максимальной плотности песчаных и глинистых пород и необходимое для этого оборудование.
15. Какое основное оборудование необходимо иметь для исследования основных физических свойств горных пород?

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВОДНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Главнейшими свойствами, определяющими отношение горных пород к воде, являются их водоустойчивость, влагоемкость, капиллярность и водопроницаемость. При инженерно-геологической оценке горных пород водные свойства имеют исключительно важное значение. Однако роль каждого из них при этом неодинакова, что зависит от принадлежности горных пород к той или иной группе по инженерно-геологической классификации; неодинаково их значение и при решении различных практических задач.

Детальное рассмотрение природы водных свойств горных пород и факторов, влияющих на их изменение, приведено в теоретической части курса инженерной геологии [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.]. Сводка основных показателей водных свойств горных пород дана в табл. IV-1.

§ 2. СКОРОСТЬ РАЗМОКАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Водоустойчивость, т. е. способность горных пород сохранять свое физическое состояние и прочность при увлажнении или изменении влажностного режима, имеет особенно большое значение для мягких связных пород — глинистых. Одним из показателей водоустойчивости глинистых пород являются скорость и характер их размокания в воде. В зависимости от целей исследования скорость и характер размокания пород определяют на образцах естественного сложения и влажности или на образцах нарушенного сложения, но затем уплотненных до определенного состояния при соответствующей влажности.

Для этих исследований необходимо иметь: 1) большую стеклянную банку или кристаллизатор с установленной в них сеткой с квадратными отверстиями 1 см^2 либо специальный прибор для исследования пород на размокание (рис. IV-1); 2) нож; 3) режущие кольца или формы для вырезания образцов; 4) журнал (табл. IV-2).

Последовательность определения

1. Из монолита горной породы вырезают образец кубической формы размером $5 \times 5 \times 5$ или $7 \times 7 \times 7$ см. Образец можно вырезать также с помощью режущего кольца или формы спо-

Т а б л и ц а IV-1. Основные показатели водных свойств горных пород

Свойства, характеризующие отношение горных пород к воде	Показатели, характеризующие водные свойства горных пород	Горные породы, для которых определение этих показателей имеет большое значение	Важнейшее практическое применение этих показателей
Водоустойчивость	Скорость и характер размокания	Глинистые	Оценка устойчивости и деформируемости оснований сооружений, откосов, подземных сооружений, земляного полотна дорог. Использование пород как материала для плотин, насыпей, дамб и др.
	Величина, сила и влажность набухания	То же	
	Величина и влажность усадки	Глинистые и некоторые полускальные	
	Содержание водорастворимых соединений и их состав	То же	
	Размягчаемость	Скальные и полускальные	Прогноз изменения прочности и устойчивости оснований сооружений, откосов, подземных сооружений и др.
Влагоемкость (водоемкость)	Полная влагоемкость (водоемкость)	Любые	Оценка степени увлажнения горных пород. У водоемких пород — для оценки статических запасов воды
	Максимальная молекулярная влагоемкость	Глинистые	Оценка гидрофильности пород
	Водоотдача. Коэффициент водоотдачи	Песчаные мелкозернистые и тонкозернистые	При решении вопросов осушения
		Скальные, полускальные, галечники, пески и др.	При решении вопросов осушения, оценке возможных притоков воды в котлованы, подземные выработки и др.

Продолжение табл. IV-1

Свойства, характеризующие отношение горных пород к воде	Показатели, характеризующие водные свойства горных пород	Горные породы, для которых определение этих показателей имеет большое значение	Важнейшее практическое применение этих показателей
Капиллярность	Высота капиллярного поднятия	Пески мелко- и тонкозернистые. Глинистые породы	Выяснение возможного чрезмерного увлажнения пород при неглубоком залегании уровня подземных вод или при его повышении. Оценка воздействия воды на подземные части сооружений
Водопроницаемость	Коэффициент фильтрации. Удельное водопоглощение. Коэффициент проницаемости. Коэффициент водопроводимости	Любые	При расчетах притока воды к котлованам, подземным выработкам, потерь воды на фильтрацию. При расчетах дренажей, водопонижения и др.
		Глинистые	При расчете осадок сооружений во времени

сбором, описанным выше. Вырезав из монолита образец породы, его осторожно выдавливают из режущего кольца или формы поршнем (рис. IV-2). Одновременно из монолита отбирают пробу для определения естественной влажности породы.

2. Кубик или цилиндр породы устанавливают на сетку с отверстиями 1 см^2 , которая в свою очередь должна быть установлена или подвешена в банке (или кристаллизаторе) с водой, и записывают время и дату начала испытания. Воду при испытании применяют дистиллированную или близкую по составу к той, воздействию которой порода будет подвергаться в природных условиях. При применении специального прибора для исследования пород на размокание вырезанный образец ставят на сетку прибора и опускают его в банку с водой. При этом записывают время и дату начала испытания.

3. Помещенные в воду образцы начинают размокать. Характер и скорость размокания у разных пород различны. Одни распадаются сначала на более или менее крупные куски или комки (рис. IV-3), другие сразу же на мелкие частицы и проваливаются через сетку. Некоторые образцы вначале набухают,

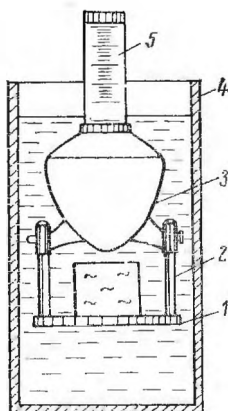


Рис. IV-1. Прибор для определения скорости размокания глинистых пород.

1 — сетка с установленным на ней образцом; 2 — кронштейн; 3 — металлический поплавок; 4 — банка с водой; 5 — шкала для определения скорости размокания (в процентах).

затем разваливаются на крупные комки. Образцы водоустойчивых пород в воде обычно сохраняют свою форму и объем без изменений продолжительное время. Все изменения образцов пород, наблюдающиеся в процессе размокания, фиксируют в журнале вначале через интервалы 5—10 мин, затем через 30 мин, через 1 ч и т. д. По мере замедления изменений состояния образцов интервалы между наблюдениями увеличивают до 1 раза в сутки. Общая продолжительность наблюдений иногда достигает 10—15 сут.

4. Опыт считают законченным, когда образец породы размокнет и провалится через сетку на дно банки или когда процесс размокания приостанавливается и образец сохраняет свое состояние без изменения продолжительное время. Результаты опыта выражают в виде интервала времени, требующегося для полного размокания образца породы (скорость размокания), кроме того, дают описание характера размокания. Если образец породы не размокает, необходимо дать подробное описание его поведения в воде. Все наблюдения, произведенные в процессе испытания, записывают в журнал (см. табл. IV-2), а окончательные результаты — в сводную таблицу (приложение 3).

5. При определении скорости и характера размокания пород на образцах нарушенного сложения испытания выполняют в следующем порядке. Породу нарушенного сложения увлажняют до состояния оптимальной влажности (см. гл. III, § 8) или любой другой влажности, при которой ее будут укладывать в тело земляного сооружения.

Таблица IV-2. Журнал для определения скорости размокания глинистых пород

Лабораторный номер	Дата наблюдения	Время наблюдения	Характер размокания породы	Примечание

Увлажненную породу тщательно перемешивают до образования однородной массы и оставляют на сутки для размокания. Чтобы порода не высыхала, чашку с породой помещают в эксикатор с водой. Из приготовленной таким образом влажной массы вырезают образцы режущими кольцами или формами, в которых затем их уплотняют до максимальной или необходимой плотности. Уплотнение образцов производят на рычажных прессах или в специальных приборах для предварительного уплотнения нагрузками, необходимыми для достижения указанной плотности. После стабилизации уплотнения образцы выдавливают из колец или форм и подвергают испытаниям на размокание так же, как и образцы пород естественного сложения и влажности.

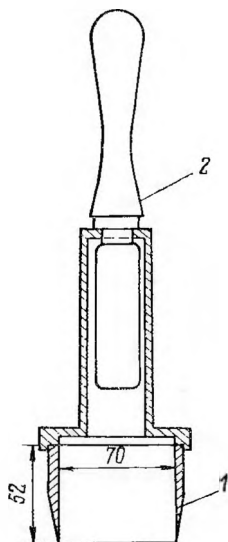


Рис. IV-2. Приспособление для вырезания образцов режущим кольцом.

1 — режущее кольцо;
2 — ручка с упором.

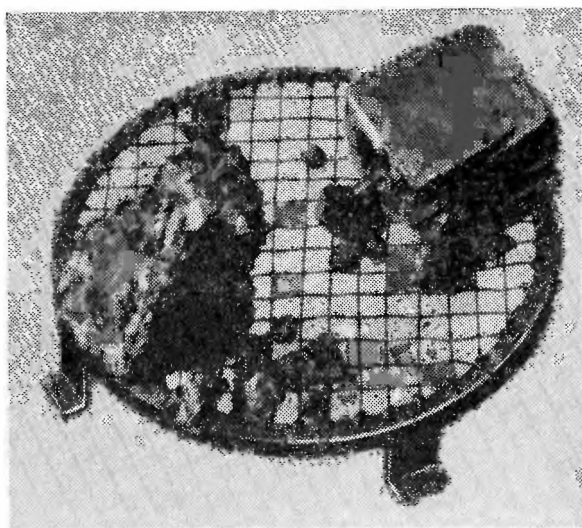


Рис. IV-3. Образцы породы на сетке после испытания их на размокание.

§ 3. РАЗМЯГЧАЕМОСТЬ СКАЛЬНЫХ И ПОЛУСКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Водоустойчивость скальных и полускальных горных пород характеризуется коэффициентом размягчаемости K_p , численно равным отношению временного сопротивления сжатию образца породы, насыщенного водой, $R_{сж. в.}$, к временному сопротивлению сжатию образца породы в воздушно-сухом состоянии $R_{сж. с.}$:

$$K_p = R_{сж. в.} / R_{сж. с.}$$

Методика определения временного сопротивления горных пород сжатию приводится в гл. V.

§ 4. ВЕЛИЧИНА И ВЛАЖНОСТЬ НАБУХАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Способность пород при увлажнении увеличивать свой объем называется набуханием. Набухание, свойственное главным образом глинистым породам, характеризует их водоустойчивость. Показателями набухания являются: величина набухания, выражаемая обычно в процентах от первоначального объема породы; влажность набухания, т. е. влажность породы, соответствующая максимальной величине набухания; относительное набухание, показывающее развитие относительных деформаций породы при увлажнении; сила набухания, т. е. напряжение, развивающееся в породе в результате ее набухания при увлажнении, которую выражают в единицах килограмм-сила на квадратный сантиметр или паскаль ($1 \text{ кгс/см}^2 \approx 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па} \approx \approx 0,1 \text{ МПа}$). Методика определения первых трех показателей изложена в настоящем параграфе, а определение силы набухания дано в гл. V.

Из всех известных методов определения величины и влажности набухания глинистых пород может быть рекомендован метод А. М. Васильева, который применим для испытания пород естественного и нарушенного сложения и влажности. Для определения величины и влажности набухания необходимо иметь прибор А. М. Васильева, нож и фильтровальную бумагу.

Прибор Васильева (рис. IV-4) состоит из следующих деталей: штатива 1, ванночки 2, рабочего кольца 5 с одним режущим краем высотой 25 мм, внутренним диаметром 58 мм, толщиной стенок 1,5 мм; донца 6, которое плотно надевается на торцевую часть рабочего кольца и закрепляется винтами (донце имеет решетку для беспрепятственного увлажнения об-

Рис. IV-4. Прибор А. М. Васильева для определения величины набухания глинистых пород.

разца породы); поршень 3, на который опирается ножка индикатора 4 для измерения деформаций пород при набухании.

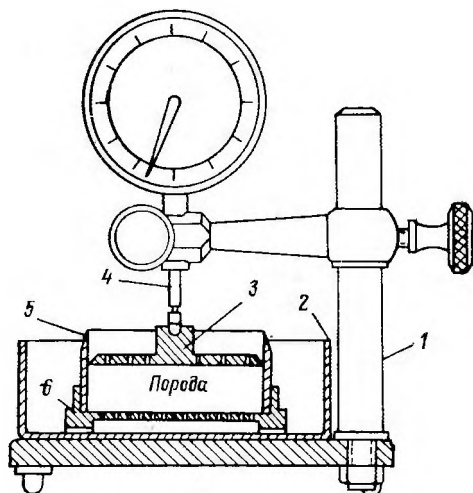
Последовательность определения

1. Из монолита породы вырезают образец режущим кольцом 5, масса которого g_1 известна. Избыток породы со стороны режущего края кольца обрезают ножом. Затем с этой стороны в кольцо вводят деревянный или металлический вкладыш, диаметр которого равен внутреннему диаметру кольца. Этим вкладышем вытесняют часть породы, которую срезают ножом вровень с торцевой частью кольца. В результате в кольце остается образец породы высотой 10—15 мм. Кольцо с породой взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г, получают массу g_2 .

2. На породу в торцевой части кольца кладут лист фильтровальной бумаги и надевают донце 6. Внутри кольца вкладывают поршень 3. В таком виде кольцо устанавливают на дно ванночки, которое предварительно покрывают пористой пластинкой или тонким слоем отсортированного песка. Ванночку устанавливают на штатив прибора. Индикатор 4 на штативе с помощью кронштейна укрепляют так, чтобы его ножка опустилась на поршень 3 прибора. Этим заканчиваются сборка прибора и подготовка породы к испытанию.

3. Записывают показания индикатора. В ванночку, где установлено кольцо с породой, наливают немного воды, так чтобы пористая пластинка или слой песка, на котором установлено кольцо, оказались затопленными. При данном положении уровень воды в ванночке будет капиллярно увлажнять образец породы, находящийся в кольце прибора. Необходимо поддерживать постоянный уровень воды в ванночке в течение всего опыта.

4. Отмечают время заливки воды в ванночку и следят за показаниями индикатора, записывая их через определенные интервалы времени (через 2, 5, 10, 20, 30 мин и далее через каж-



дый час до конца рабочего дня, затем через сутки) до тех пор, пока набухание породы не прекратится. После этого кольцо извлекают из ванночки и насухо вытирают, предварительно сняв с кольца донце, фильтровальную бумагу и поршень. Кольцо с породой взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г (получают массу g_2) и помещают в термостат, где породу высушивают до постоянной массы при температуре 105 °С. Охладив кольцо с породой в эксикаторе, его взвешивают, получают массу g_3 и вычисляют начальную и конечную влажность по формуле

$$W = [(g_2 - g_n)/(g_3 - g_1)] \cdot 100,$$

где g_1 — масса кольца; g_2 — масса кольца с породой до и после набухания; g_3 — масса кольца с породой, высушенной после испытания до постоянной массы.

Конечная влажность породы и будет влажностью набухания $W_{\text{наб}}$.

5. Величину набухания выражают обычно в долях единицы или в процентах от начального объема образца породы по приращению высоты образца в результате набухания:

$$\delta_n = (h_k - h_n)/h_n \text{ или } H_n = [(h_k - h_n)/h_n] \cdot 100,$$

где h_k — высота образца породы в кольце прибора после набухания; h_n — высота образца породы в кольце прибора до увлажнения и набухания; δ_n — относительное набухание в долях единицы; H_n — величина набухания в процентах от первоначальной высоты образца.

Развитие деформаций набухания во времени изображают в виде графика изменения величины набухания во времени.

6. Для набухающих глинистых пород по специальному заданию исследуют изменение их прочности пенетрацией или испытанием на сдвиг и определяют деформируемость испытанием на компрессию (см. гл. V) в результате увлажнения — набухания.

7. При необходимости определения величины и влажности набухания пород нарушенного сложения приготавливают образцы заданной влажности — плотности (см. гл. V) и подвергают их испытаниям на набухание так же, как и образцы естественного сложения и влажности.

8. Все данные, полученные в процессе опытов, записывают в журнал, а окончательный результат заносят в сводную таблицу (приложение 3) и изображают в виде графиков развития деформаций набухания во времени или развития деформаций набухания породы под различными нагрузками (см. гл. V).

§ 5. ВЕЛИЧИНА И ВЛАЖНОСТЬ УСАДКИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Усадкой глинистых пород называется уменьшение их объема при высыхании. Свойством усадки обладают главным образом глинистые породы, так как они особенно чувствительны к изменениям влажностного режима. Показателями, характеризующими усадку, являются величина и предел усадки. Под последним обычно понимают влажность породы, при уменьшении которой дальнейшего изменения объема породы не происходит. Для определения величины и предела усадки необходимы режущие цилиндры и оборудование для определения влажности пород.

Последовательность определения

1. Из монолита естественного сложения и влажности вырезают образец с помощью режущего цилиндра. Внутреннюю часть цилиндра предварительно следует смазать вазелином. Одновременно с вырезыванием образца породы отбирают пробу для определения ее начальной влажности.

2. Вырезанный образец породы, не вынимая из цилиндра, высушивают на воздухе в течение 1—2 сут. По мере подсыхания образец дает усадку и отходит от стенок. При достижении этой стадии усадки образец породы вынимают из цилиндра и продолжают сушить на воздухе 1—2 сут. Подсохший образец сушат в термостате при температуре 105 °С до постоянной массы.

3. Определяют объем высушенного образца методом непосредственных измерений или методом парафинирования (см. гл. III, § 3). Затем вычисляют величину и влажность (предел) усадки:

$$V_y = [(V - V_0)/V] \cdot 100,$$

где V_y — объемная усадка, %; V — объем режущего цилиндра; V_0 — объем высушенного образца;

$$W_y = W_n - 100(V - V_0)/g,$$

где W_y — предел усадки; W_n — начальная влажность породы; g — масса сухого образца породы после усадки.

4. При определении величины и влажности усадки пород нарушенного сложения приготавливают образцы заданной влажности — плотности (см. гл. V) и подвергают их испытаниям на усадку, как и образцы естественного сложения и влажности.

5. Все данные испытаний записывают в журнал, а окончательный результат заносят в сводную таблицу (приложение 3).

§ 6. ПОЛНАЯ ВЛАГОЕМКОСТЬ (ВОДОЕМКОСТЬ) ГОРНЫХ ПОРОД

Если все поры горных пород заполнены водой, то влажность влагоемких пород при этом соответствует их полной влагоемкости. У пород невлагоемких (например, песков, гравия, галечников, трещиноватых скальных и полускальных пород) влажность при полном их насыщении характеризует их водоемкость.

Полная влагоемкость (водоемкость), как уже известно, может быть вычислена по данным плотности скелета пород $\rho_{ск}$ и плотности их минеральной части ρ_m по следующей формуле:

$$W_n = 1/\rho_{ск} - 1/\rho_m.$$

Если выразить плотность скелета породы через плотность минеральной части ρ_m и пористость породы n , формула для вычисления полной влагоемкости (водоемкости) примет вид

$$W_n = n/[\rho_m(1 - n)].$$

Полная влагоемкость (водоемкость) мягких глинистых и рыхлых песчаных горных пород в лабораторных условиях определяется обычно только расчетом по данным указанных простейших показателей их свойств (ρ_m , $\rho_{ск}$, n). Однако для ее определения у песков может применяться также метод насыщения (см. гл. III, § 4). О влагоемкости скальных и полускальных горных пород обычно судят по влажности, соответствующей их водопоглощению и водонасыщению.

§ 7. ВОДОПОГЛОЩЕНИЕ И ВОДОНАСЫЩЕНИЕ СКАЛЬНЫХ И ПОЛУСКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

При исследовании влагоемкости скальных и полускальных горных пород определяют их водопоглощение, водонасыщение и коэффициент водонасыщения. Водопоглощение характеризуется влажностью породы при свободном насыщении ее водой, а водонасыщение — при насыщении ее водой в особых условиях, т. е. при принудительном насыщении. Для определения водопоглощения и водонасыщения необходимо иметь то же оборудование, что и при определении влажности пород, а также банки или кристаллизаторы и вакуум-эксикаторы, в которых осуществляют свободное и принудительное насыщение образцов водой.

Последовательность определения

1. Образцы в виде кубиков (размером $50 \times 50 \times 50$ или $70 \times 70 \times 70$ мм) или цилиндров (высотой и диаметром 50 или 70 мм) высушивают до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105°C . Можно использовать также образцы неправильной формы массой не менее 200 г. После высушива-

ния образцы охлаждают в эксикаторе и взвешивают, получают массу g_c .

2. Для определения водопоглощения, т. е. влажности пород при свободном их насыщении водой, насыщение образцов производят одним из двух способов. По первому способу высушенные образцы помещают в банку или кристаллизатор на подставки (стеклянные пластинки), в который наливают воду до уровня, чтобы образцы погрузились в воду на $\frac{1}{3}$ их высоты. По истечении 2 ч воду добавляют до $\frac{2}{3}$ высоты образцов, а по истечении еще 2 ч образцы заливают полностью так, чтобы уровень воды был выше их верха не менее чем на 2 см. В таком положении образцы выдерживают в воде 5 или 45 суток, т. е. применяют 5-суточное или 45-суточное насыщение водой. После этого их вынимают из воды, обтирают влажным полотенцем, взвешивают и получают массу g_b . Водопоглощение вычисляют по формуле

$$W_{\pi} = [(g_b - g_c)/g_c] \cdot 100.$$

По другому способу высушенные и взвешенные образцы укладывают в банку или кристаллизатор с водой сразу. При этом уровень воды в банке должен быть выше верха образцов также не менее 2 см. В таком положении образцы выдерживают в воде в течение 2 сут. После этого образцы вынимают из воды, обтирают, взвешивают и вычисляют водопоглощение так же, как и в предыдущем случае. Масса воды, вытекающей из пор образца на чашку весов, должна включаться в массу насыщенного водой образца. Выбор срока насыщения образцов водой определяется водоустойчивостью пород и видом использования их для проектируемых сооружений.

3. Для определения водонасыщения, т. е. влажности пород при принудительном насыщении их водой, применяют вакуум-эксикаторы. Высушенные и взвешенные образцы помещают в вакуум-эксикатор и вакуумируют в нем в течение 14 ч при остаточном разрежении воздуха, равном 0,1 мм рт. ст. (13,3 Па). Затем на дно вакуум-эксикатора, не снимая вакуума, по стеклянной трубке через кран подают воду. После того как вода покроет образцы полностью, их выдерживают в вакууме до прекращения выделения пузырьков воздуха. Затем снимают вакуум и выдерживают образцы в эксикаторе при атмосферном давлении 1 сут. После этого их извлекают из воды, обтирают влажным полотенцем и вычисляют водонасыщение по формуле

$$W_n = [(g_b - g_c)/g_c] \cdot 100.$$

Водонасыщение можно определять также методом кипячения. Образцы, высушенные и взвешенные, помещают в эмалированный бачок, заливают водой и кипятят в течение 4 ч. Уровень воды в бачке должен сохраняться постоянным. Затем

образцы охлаждают до комнатной температуры, извлекают из воды, обтирают, взвешивают и вычисляют водонасыщение. Последний способ не всегда применим из-за малой водоустойчивости пород.

4. Водопоглощение и водонасыщение определяют каждое по трем-пяти параллельным образцам и вычисляют среднее значение. По этим данным вычисляют коэффициент водонасыщения K_n . Все данные, получаемые в процессе испытаний пород, записывают в журнал, а окончательные результаты — в сводную таблицу (приложение 3).

§ 8. МАКСИМАЛЬНАЯ МОЛЕКУЛЯРНАЯ ВЛАГОЕМКОСТЬ

Глинистые породы

Наиболее простым и объективным методом определения максимальной молекулярной влагоемкости глинистых пород является метод влагоемких сред. При определении максимальной молекулярной влагоемкости пород этим методом необходимо иметь: 1) металлический шаблон (пластинка толщиной 2 мм) с круглым отверстием диаметром 5 см; 2) пресс масляный, гидравлический, рычажный или завинчивающийся до отказа; 3) весы технические; 4) бюксы стеклянные или алюминиевые; 5) эксикатор; 6) сушильный шкаф; 7) сито с диаметром отверстий 1 мм; 8) ступку с резиновым пестиком; 9) чашку фарфоровую диаметром 10—15 см; 10) шпатель; 11) журнал.

Последовательность определения

1. Максимальную молекулярную влагоемкость глинистых пород (глин, суглинков, супесей) по возможности следует определять только по образцам естественной влажности. Подготовка пород к испытаниям сохраняется полностью такая же, как и при определении предела текучести глинистых пород стандартным методом (см. гл. III, § 6).

2. Подготовленную массу породы после размокания еще раз тщательно перемешивают. Берут 20 листов фильтровальной бумаги и на них укладывают шаблон, который наполняют приготовленной породой. Избыток породы срезают ножом ровно с плоскостью шаблона, затем шаблон снимают, а получившуюся лепешку из массы породы покрывают другими 20 листами фильтровальной бумаги.

3. Фильтровальную бумагу с лепешкой из породы укладывают между двумя деревянными брусками или металлическими пластинками и помещают под пресс для прессования.

4. Прессование ведут в течение 10 мин, причем давление должно быть равно 6,55 МПа на площади лепешки из породы.

5. По окончании прессования лепешку из породы освобождают от фильтровальной бумаги и определяют ее влажность, которая должна соответствовать максимальной молекулярной влагоемкости породы. Для контроля повторяют опыт со второй грунтовой лепешкой. Расхождения в результатах параллельных определений не должны превышать 2 %. Следует заметить, что нагрузка 6,55 МПа принята средняя, она примерно равна минимальным силам взаимодействия между поверхностными слоями физически связанной воды и глинистыми частицами. В зависимости от минерального состава глинистых частиц, минерализации и состава поровой воды толщина гидратной оболочки физически связанной воды и соответственно сила взаимодействия вода — частица могут изменяться в некоторых пределах. Однако с достаточной точностью для практических целей эту силу взаимодействия можно принять равной 6,55 МПа. При меньших нагрузках на породу в ней будет частично оставаться свободная иммобилизованная вода.

6. Все результаты, полученные в процессе опытов, записывают в журнал, а окончательные данные заносят в сводную таблицу.

Пески

Для определения максимальной молекулярной влагоемкости песков наиболее пригодным является метод высоких колонн. Определение максимальной молекулярной влагоемкости породы этим методом производится с помощью прибора, изображенного на рис. IV-5. Прибор состоит из стеклянной или металлической трубки диаметром 3—4 см и длиной до 100 см. Трубка имеет боковые отверстия диаметром 1,5—2 см, расположенные друг от друга на расстоянии 10 см. Нижнее боковое отверстие находится на расстоянии 5 см от края трубки. В дно трубки впаяна небольшая трубочка с сеткой. К этой трубочке при установке прибора присоединяют шланг от напорного бака. При определении максимальной молекулярной влагоемкости следует иметь все необходимое для определения влажности породы.

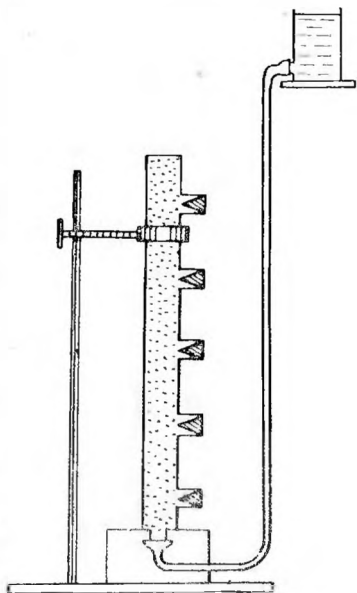


Рис. IV-5. Установка для определения максимальной молекулярной влагоемкости песков методом высоких колонн.

Последовательность определения

1. Боковые отверстия закрывают резиновыми пробками и трубку наполняют испытуемым песком. Наполнение трубки песком производят небольшими порциями с легкой трамбовкой.

2. Наполнив трубку породой, к ней присоединяют шланг от напорного бака. Затем, периодически открывая зажим на шланге, медленно с остановками насыщают песок водой до появления пленки воды на его поверхности.

3. После насыщения песка водой шланг от трубки отсоединяют и дают свободно стечь из прибора свободной гравитационной воде.

4. По прекращении стока из трубки воды из каждого бокового отверстия берут пробу породы и определяют влажность. Пробы породы отбирают в предварительно взвешенные бюксы и сразу же взвешивают на технических весах. Затем для каждой пробы песка определяют влажность.

5. По полученным данным выделяют в верхней части прибора зону постоянной влажности, среднее значение которой соответствует максимальной молекулярной влагоемкости песка. Для установления зоны постоянной влажности результаты опыта записывают по форме, приведенной в табл. IV-3.

Количество воды, которое пошло на испытание породы в трубке, характеризует ее водоемкость, равную влажности породы при полном насыщении водой. Следовательно, водоемкость породы в данном случае должна быть равна

$$W_n = (g_2/g_1) \cdot 100,$$

Т а б л и ц а IV-3. Влажность песка после стекания воды

Номер бокового отверстия	Влажность, %		Максимальная молекулярная влагоемкость, %
1	1,6	} Зона постоянной влажности	1,7
2	1,7		
3	1,6		
4	1,8		
5	1,7		
6	1,9	} Переходная зона	
7	6,2		
8	14,9	} Зона капиллярной влажности	
9	15,1		
10	15,6		

где W_n — полная водоемкость породы, %; g_2 — масса воды, пошедшей на насыщение породы, загруженной в трубку; g_1 — масса сухой породы, загруженной в трубку.

§ 9. ВОДООТДАЧА ПЕСКОВ И ДРУГИХ РЫХЛЫХ ОБЛОМОЧНЫХ ПОРОД

Способность песков и других рыхлых обломочных пород, насыщенных водой, отдавать определенное количество воды путем свободного ее стекания характеризует их водоотдачу. Следовательно, для определения водоотдачи таких пород необходимо знать их полную водоемкость W_n и максимальную молекулярную влагоемкость $W_{м\max}$. Разность между ними и будет равняться водоотдаче пород:

$$W_{\text{отд}} = W_n - W_{\text{м\max}}.$$

Полная водоемкость песков может определяться расчетом (см. § 6) или, как и для других обломочных пород, методом насыщения (см. § 8, а также гл. III, § 4). В этом случае количество воды, которое пошло на насыщение породы при данной ее плотности, отнесенное к массе сухой породы и выраженное в процентах, будет равно полной водоемкости породы. Для определения максимальной молекулярной влагоемкости песков, для вычисления их водоотдачи целесообразно применять метод высоких колонн (см. рис. IV-5). Для галечников и других рыхлых обломочных пород максимальную молекулярную влагоемкость определяют также методом высоких колонн, но только не для всей породы, а для заполнителя (мелкозема — песка).

Метод высоких колонн может применяться для определения не только полной водоемкости, максимальной молекулярной влагоемкости и водоотдачи пород, но и для определения коэффициента водоотдачи. Последний, как известно, равен отношению объема свободно стекающей воды к объему породы:

$$\mu_v = V_v/V_n,$$

где V_v — объем воды, свободно стекающей из объема породы, загруженной в трубку; V_n — объем породы, загруженной в трубку.

§ 10. ВЫСОТА КАПИЛЛЯРНОГО ПОДНЯТИЯ ВОДЫ В ПЕСКАХ

Метод непосредственных наблюдений

Этот метод определения высоты капиллярного поднятия применим главным образом для песков. Для глинистых пород он рекомендован быть не может, так как высота капил-

лярного поднятия воды в них измеряется метрами, а время, необходимое для установления этой высоты, исчисляется месяцами.

Для определения высоты капиллярного поднятия этим методом необходимо следующее: 1) стеклянная трубка диаметром 2—3 см, длиной 80—100 см, подвязанная с одного конца марлей или сеткой; 2) стеклянная банка или кристаллизатор; 3) воронка; 4) штатив; 5) журнал.

Последовательность определения

1. Стеклянную трубку наполняют через воронку испытуемым песком. Наполнение производят небольшими порциями с легкой трамбовкой.

2. Трубку с песком ставят в стеклянную банку или кристаллизатор на специальную подставку или на две спички. Банка (кристаллизатор) в свою очередь должна быть установлена на подставке штатива. В таком положении трубку укрепляют в штативе (рис. IV-6).

3. В банку приливают воды на 0,5—1 см выше нижнего конца трубки и наблюдают за высотой капиллярного поднятия воды в песке по изменению его окраски (потемнению). Уровень воды в банке в течение опыта следует поддерживать постоянным.

4. Высоту капиллярного поднятия воды в песках фиксируют в журнале через 5, 20, 30 мин и через часовые и суточные промежутки до окончания поднятия. Установившийся в песке уровень считают максимальной высотой капиллярного поднятия H_k .

Метод капилляриметра

Этот метод определения высоты капиллярного поднятия применим главным образом для песков, хотя иногда его используют и при исследовании глинистых пород (супесей, суглинков) естественного и нарушенного сложения. При использовании этого метода необходимо иметь специальный прибор, называемый капилляриметром. Для регистрации всех данных, получаемых в процессе подготовки и выполнения опыта, необходимо иметь журнал.

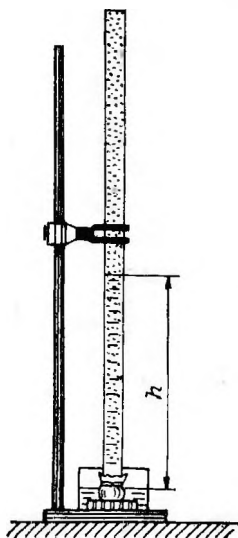
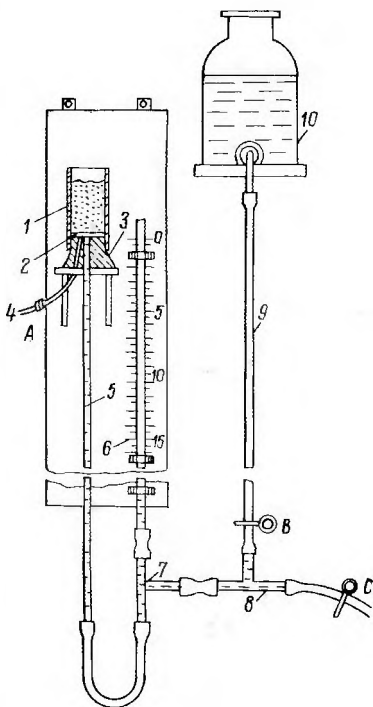


Рис. IV-6. Установка для определения высоты капиллярного поднятия воды путем непосредственного наблюдения.

Рис. IV-7. Капилляриметр конструкции Г. Н. Каменского.

Наиболее применим в лабораторной практике капилляриметр конструкции Г. Н. Каменского (рис. IV-7).

Основной частью прибора является стеклянная трубка 1 высотой около 20 см и диаметром 4—6 см. В нижней части трубки укреплена металлическая сетка 2 и резиновая пробка 3 с двумя отверстиями разного диаметра. В отверстие малого диаметра пробки вставлена тонкая стеклянная трубка 4 с резиновой трубкой и зажимом А; в другое отверстие пробки вставлена стеклянная трубка 5 диаметром 0,5—1 см, к которой через резиновую трубку прикрепляется U-образный манометр 6. В нижней части этого манометра имеется тройник 7, свободный конец которого соединяется с другим тройником 8. Последний соединяется с водонапорным баком 10 через резиновую или стеклянную трубку 9, на которой укреплен зажим В. Другой конец тройника заканчивается резиновой трубкой длиной 10—12 см с зажимом С. Манометр 6 и основная стеклянная трубка 1 укреплены на деревянной панели, которую подвешивают на стене. На панели вдоль правого колена манометра имеется сантиметровая шкала. Нуль шкалы находится на уровне металлической сетки 2.



Последовательность определения

1. Стеклянную трубку 1 заполняют исследуемой породой на высоту 8 см. Наполнение ведут небольшими порциями и сопровождают трамбовкой. Если порода содержит мелкие глинистые частицы, то на медную сетку насыпают слой крупнозернистого песка.

Для определения высоты капиллярного поднятия в глинистой породе естественного сложения можно применять метод Ф. П. Саваренского. Монолит отбирают режущим цилиндром такого же диаметра, как и трубка 1 капилляриметра. Этот цилиндр в нижней части закрывают резиновой пробкой с от-

верстиями и устанавливают в качестве верхней части капилляриметра. Определение высоты капиллярного поднятия воды в глинистых породах естественного сложения можно производить непосредственно в капилляриметре Каменского. Для этого вырезают монолит и устанавливают его на смоченный буферный слой песка в трубке 1 капилляриметра. Остающийся зазор между монолитом и стенками трубки заполняют вязкой глиной или расплавленным парафином.

2. Открывают зажимы *A* и *B* и закрывают зажим *C*; постепенно насыщают породу водой до появления на ее поверхности водной пленки. Насыщение породы водой ведут медленно, с остановками, чтобы не разрыхлить загруженную в прибор породу. Зажим *A* должен быть открыт для выпуска скопившегося воздуха до появления в малой трубочке воды, после чего его закрывают.

3. После насыщения породы водой зажим *B* закрывают, а зажим *C* медленно открывают. При этом уровень воды в правом колене манометра будет постепенно понижаться до определенного момента, после которого уровень воды в трубке остановится или начнет подниматься вверх.

4. В тот момент, когда уровень воды в правом колене манометра остановится, необходимо сделать отсчет по шкале, который и будет соответствовать высоте капиллярного поднятия воды испытуемой породы. Для того чтобы момент остановки уровня воды в манометре не пропустить, необходимо зажим *C* открывать постепенно, чтобы вода стекала медленно.

5. Для проверки результатов опыт повторяют.

6. Весь ход опыта описывают в журнале, а окончательный результат записывают в сводную таблицу.

§ 11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Показатели водопроницаемости горных пород — коэффициент фильтрации, коэффициент водопроводимости, коэффициент проницаемости и удельное водопоглощение. Для определения коэффициентов фильтрации и проницаемости применяют как полевые, так и лабораторные методы. Причем в лабораторных условиях коэффициент фильтрации определяют главным образом для пород рыхлых несвязных — песчаных и для пород мягких связных — глинистых. Для грубообломочных пород, а также для скальных и полускальных, водопроницаемость которых зависит преимущественно от их скважности и трещиноватости, коэффициент фильтрации определяют только полевыми методами. Коэффициент проницаемости любых горных пород можно определять лабораторными и полевыми методами, а удельное водопоглощение — только полевыми.

Коэффициент фильтрации в лабораторных условиях определяется с помощью специальных приборов на образцах есте-

ственного и нарушенного сложения и косвенным путем по гранулометрическому составу и пористости пород или по времени, необходимому для уплотнения породы заданной нагрузкой. В зависимости от применяемых приборов лабораторные определения могут быть разделены на две группы. Первую группу представляют приборы, которые при определении коэффициента фильтрации позволяют учитывать влияние нагрузки, — компрессионно-фильтрационные приборы (Н. Н. Маслова и др.). Вторую группу составляют приборы, определение коэффициента фильтрации в которых производится без учета влияния нагрузки (приборы Г. Н. Каменского, Г. Тиме и др.).

Все лабораторные методы определения коэффициента фильтрации являются менее точными по сравнению с полевыми, так как они основаны на исследовании свойств отдельных образцов, взятых из толщи пород. При полевых же методах (откачках, нагнетаниях) исследуют не отдельные образцы, а целые комплексы отложений, находящихся в условиях естественного залегания. Поэтому в тех случаях, когда по лабораторным определениям должна быть дана средняя характеристика целого комплекса отложений, исследованиям должно быть подвергнуто достаточное количество образцов, взятых через небольшие интервалы из этого комплекса отложений. Иногда бывает необходимо выяснить фильтрационные свойства маломощных слоев, прослоек или линз пород иного состава, чем вмещающая их толща пород. В этих случаях лабораторные методы наиболее удобны, так как позволяют производить исследования пород выборочно, из отдельных горизонтов.

Некоторые лабораторные методы в настоящее время пока нельзя заменить ни одним из полевых методов, например, определение коэффициента фильтрации на приборах, позволяющих учитывать влияние нагрузки, что представляет особый интерес при оценке строительных качеств пород. Наконец, многие лабораторные методы не требуют сложного оборудования, нетрудоемки, отличаются простотой и низкой стоимостью. Поэтому они позволяют производить массовые исследования.

Наиболее точные результаты дают приборы, позволяющие определять коэффициент фильтрации по образцам естественного сложения (приборы Н. Н. Маслова, Г. Н. Каменского и др.). Наименее точным является определение коэффициента фильтрации путем расчета по гранулометрическому составу и пористости пород. Этот метод применим главным образом для песчаных пород. Для глинистых пород он рекомендован быть не может, так как их фильтрационные свойства зависят не только от гранулометрического состава, но и от их сложения.

Описание лабораторных методов определения коэффициента фильтрации и коэффициента проницаемости пород приводится ниже.

Прибор Г. Н. Каменского

Прибор Каменского для определения коэффициента фильтрации рыхлых пород наиболее распространен в лабораторной практике. Он применим для испытания пород нарушенного и естественного сложения. При определении коэффициента фильтрации кроме прибора необходимо иметь следующее оборудование: 1) бутылку стеклянную с тубусом объемом 5—8 л; 2) мерный цилиндр объемом 500 см³; 3) часы или секундомер; 4) термометр; 5) журнал (см. табл. IV-4).

Прибор Каменского (рис. IV-8) состоит из цилиндра 1 и распределительного резервуара 9, присоединенного к цилиндру болтами и фланцем 8. Цилиндр отделен от распределительного резервуара металлическим диском 6, который вместе с резиновыми прокладками зажимается между фланцами. На диске 6 с верхней стороны напаяно кольцо 5, внутри которого име-

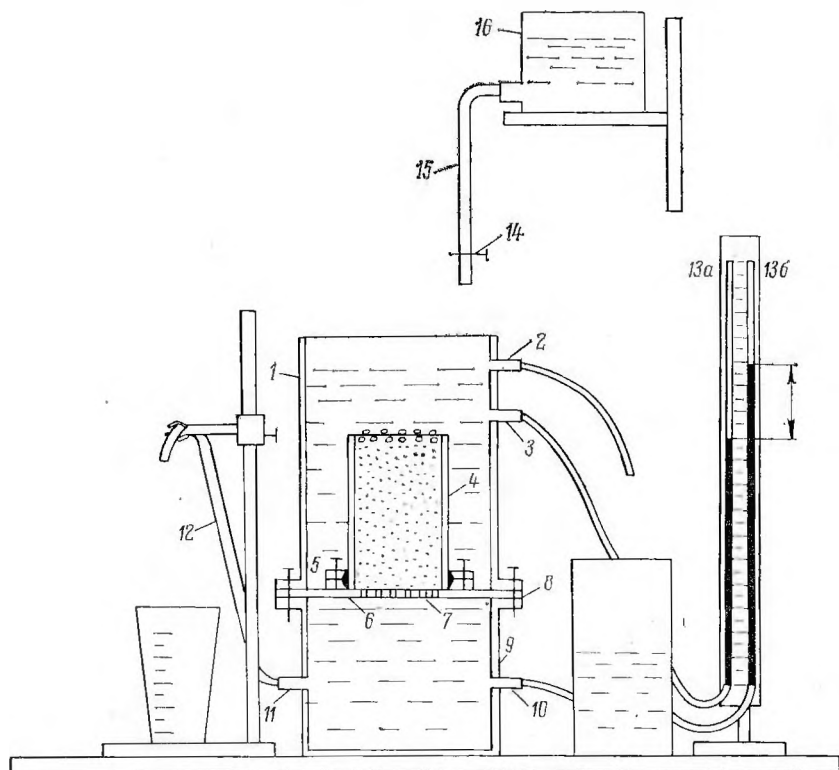


Рис. IV-8. Прибор Г. Н. Каменского для определения коэффициента фильтрации песчаных и глинистых пород.

ется дырчатая решетка 7. Напаянное кольцо 5 имеет болты с резьбой. При испытаниях в кольцо 5 на решетку 7 устанавливают режущий цилиндр 4 с породой. Диаметр цилиндра 10 см, высота 5, 10 или 15 см. После установки режущего цилиндра 4 на него надевают второе кольцо, имеющее отверстия, в которые пропускают болты с резьбой. На болты навинчивают гайки, которые стягивают кольца и зажимают находящуюся между ними круглую резиновую прокладку и режущий цилиндр.

Цилиндр 1 сбоку имеет два отверстия, в которые впаяны штуцера 2 и 3. Нижний штуцер 3 через резиновую трубку присоединен к стеклянному пьезометру 13а, а верхний 2 служит для поддержания постоянного уровня воды в приборе. Распределительный резервуар 9 имеет два отверстия со штуцерами 10 и 11, из которых к одному (10) через резиновую трубку присоединен второй стеклянный пьезометр 13б, а к другому (11) присоединена резиновая регулирующая трубка 12, служащая для насыщения породы водой при загрузке прибора и для регулирования напора и стока фильтрующейся воды во время опыта.

Стеклянные пьезометры 13а и 13б укреплены на деревянной панели с миллиметровой шкалой. Нуль шкалы должен находиться в нижней части панели. Прибор устанавливают на столе; выше на специальной подставке или полке устанавливают бутылку с тубусом 16, от которого отходит подводящая трубка 15 с зажимом 14. Резиновую регулирующую трубку 12 прибора укрепляют на штативе.

Последовательность определения

1. Установив прибор на столе, нижнюю часть его до решетки 7 заливают водой через резиновую регулирующую трубку 12, которую для этой цели присоединяют к подводящей трубке 15 бутылки с водой.

2. Из монолита с помощью режущего цилиндра 4 вырезают образец способом, изложенным выше (см. гл. III, § 3). Режущим цилиндром 4 монолит может быть также вырезан непосредственно в полевых условиях в той или иной горной выработке. Монолит помещают внутрь цилиндра 1 на решетку 7, на которую положена мелкая металлическая сетка или марля.

При испытании породы нарушенного сложения загружают прибор породой с трамбовкой и насыщением водой. Насыщение производят снизу периодическим открыванием зажима 14 у подводящей трубки. Загружать прибор необходимо до уровня верхнего края режущего цилиндра 4. Зная объем режущего цилиндра и массу породы (например, песка), загруженной в цилиндр, вычисляют плотность или плотность скелета

породы, т. е. плотность, при которой она будет испытываться на водопроницаемость. При отсутствии специального задания коэффициент фильтрации песков следует определять при их рыхлом и плотном сложении. Испытуемую породу в приборе следует прикрыть слоем гравия толщиной 2—3 см, чтобы предохранить его от размыва при поступлении воды в прибор сверху.

3. По окончании загрузки прибора породой подачу воды снизу прекращают. Регулирующую трубку 12 отсоединяют от подводящей трубки 15 и закрепляют на штативе на уровне верхнего бокового отверстия штуцером 2. Подводящую трубку 15 переводят на верх прибора и, приоткрыв зажим 14, заполняют прибор водой до верхнего бокового отверстия со штуцером 2.

4. Подготовив прибор к опыту, производят проверку работы пьезометров. Если регулирующая резиновая трубка 12 закреплена на уровне верхнего бокового отверстия со штуцером 2, движения воды через породу не должно происходить, поэтому уровень воды в обоих пьезометрах (13а, 13б) должен находиться на одной и той же высоте. Если уровень воды в пьезометрах не устанавливается на одной высоте, то это означает, что один из них неисправен: он или пропускает воду, или засорился, или в нем имеются пузырьки воздуха. Неисправности пьезометров необходимо устранить.

5. Проверив работу пьезометров, приступают к опыту, для чего регулирующую резиновую трубку 12 устанавливают на высоте половины верхней трети испытуемого столба породы, загруженного в прибор. При таком положении регулирующей трубки 12 в приборе создается напорный градиент, под влиянием которого вода начнет фильтроваться через породу и стекать через регулируемую трубку 12.

6. Для поддержания постоянного уровня воды в приборе и, следовательно, постоянного напорного градиента открывают зажим 14 у подводящей трубки 15, через которую из бутылки вода поступает в прибор. Поступление воды в прибор стараются отрегулировать зажимом так, чтобы ее было достаточно на фильтрацию через породу и уровень ее в приборе держался постоянным. Последнее достигается, если вода одновременно с фильтрацией через породу будет также каплями или слабой струйкой стекать через верхнее боковое отверстие прибора со штуцером 2.

7. После установления постоянного положения уровня воды в пьезометрах при фильтрации воды через породу производят:

а) отсчеты показаний по пьезометрам и вычисления разности уровней воды в пьезометрах;

б) измерение расхода воды, стекающей из регулирующей трубки 12, за время t (с), необходимое для наполнения мер-

ного цилиндра объемом V (см^3), подставляемого под регулирующую трубку; отсюда расход ($\text{см}^3/\text{с}$)

$$Q = V/t;$$

в) измерение температуры воды в приборе.

8. По полученным данным вычисляют коэффициент фильтрации по следующей формуле:

$$K_{\phi} = Q \cdot 864 / (FI),$$

где Q — расход воды, фильтрующейся через площадь поперечного сечения F в единицу времени, замеренный в процессе опыта, $\text{см}^3/\text{с}$; F — площадь поперечного сечения режущего цилиндра прибора, равная площади сечения породы, через которую фильтруется вода, см^2 ; I — напорный градиент, равный отношению среднего напора к длине пути фильтрации l , т. е. $I = h/l$ (где l — высота режущего цилиндра 4 , см); K_{ϕ} — коэффициент фильтрации, $\text{м}/\text{сут}$; 864 — переходный коэффициент, $\text{см}/\text{с}$ или $\text{м}/\text{сут}$.

9. Для приведения результатов опыта к постоянной температуре, например к 10°C или какой-либо другой, вычисляют и учитывают температурную поправку $ТП$ по формуле Пуазейля

$$ТП = 1 + 0,0337t + 0,000221t^2.$$

Для приведения результатов опыта к необходимой температуре полученный коэффициент фильтрации умножают на поправку, соответствующую той температуре воды, к которой нужно привести полученный коэффициент, и делят на поправку, отвечающую температуре, при которой было произведено определение коэффициента фильтрации:

$$K_{\phi, \text{иск}} = K_{\phi, \text{факт}} ТП_{\text{иск}} / ТП_{\text{факт}}.$$

Чтобы не производить каждый раз вычислений температурной поправки $ТП$ по формуле, в приложении 2 приведена таблица поправок для различных температур.

Для лучшего пояснения правила пользования температурной поправкой по формуле Пуазейля рассмотрим следующий пример: $K_{\phi} = 8$ $\text{м}/\text{сут}$ при $t = 17^\circ\text{C}$. Требуется определить K_{ϕ} при $t = 10^\circ\text{C}$. По таблице (см. приложение 2) находим поправку $ТП$ для 10°C , равную $1,36$, и для 17°C , равную $1,64$; вычисляем K_{ϕ} при 10°C по приведенной формуле:

$$K_{\phi 10} = 8 \cdot 1,36 / 1,64 = 6,63 \text{ м/сут.}$$

Для характеристики водопроницаемости водоносных пород часто пользуются также коэффициентом водопроводимости T ($\text{м}^2/\text{сут}$), равным произведению коэффициента фильтрации на мощность водоносного горизонта:

$$T = K_{\phi} h,$$

где h — средняя мощность водоносного горизонта.

Коэффициент водопроводимости характеризует способность водоносных горных пород мощностью h на участке длиной 1 м пропускать воду в единицу времени при напорном градиенте, равном единице.

10. Вычислив коэффициент фильтрации после первого опыта, испытания повторяют еще при двух различных напорных градиентах. Для этого регулирующую резиновую трубку 12 при втором опыте устанавливают на высоте половины, а при третьем опыте — на высоте половины нижней трети испытуемого столба породы, загруженной в прибор. При испытании породы нарушенного сложения опыты повторяют в той же последовательности, но породу в прибор загружают при другой или заданной плотности.

11. Все отсчеты и измерения, сделанные в процессе опыта, и вычисления коэффициента фильтрации записывают в рабочий журнал (табл. IV-4), а окончательный результат — в сводную таблицу (приложение 3).

Прибор Г. Тиме

Прибор Г. Тиме применяют для испытания главным образом рыхлых несвязных пород нарушенного сложения. При определении коэффициента фильтрации в приборе Г. Тиме кроме этого прибора необходимо иметь: 1) бутылку стеклянную с тубусом объемом 5—8 л, наполненную водой; 2) мерный цилиндр объемом 500 см³; 3) секундомер; 4) термометр; 5) журнал (см. табл. IV-4).

Прибор Тиме (рис. IV-9) состоит из цилиндра 1 высотой 40 см и диаметром 10 см с глухим закрытым дном. В нижней части цилиндра на высоте 5—10 см от дна укреплен металлическая решетка 4, разделяющая цилиндр на две неравные части. Верхнюю его часть при испытаниях загружают породой, нижнюю заливают водой. Верхняя часть цилиндра с одной стороны имеет три отверстия на расстоянии 10 см друг от друга, в которые впаяны штуцера 3. С внутренней стороны цилиндра отверстия закрыты мелкой проволоочной сеткой. Штуцера 3 через резиновые трубки присоединены к трем стеклянным пьезометрам 2а, 2в, 2с, служащим для измерения пьезометрического уровня воды в соответствующих сечениях цилиндра 1.

Стеклянные пьезометры 2а, 2в, 2с укреплены на деревянной панели, на которой нанесена миллиметровая шкала. Нуль шкалы находится в нижней части панели. В верхней части рабочего цилиндра 1 имеется боковое отверстие, в которое впаян штуцер 7. Оно служит для поддержания на постоянной высоте уровня воды в приборе. В нижней части рабочего цилиндра 1 имеется боковое отверстие, к которому через штуцер 5 присоединена резиновая регулирующая трубка 6, служащая для на-

Т а б л и ц а IV-4. Журнал для определения коэффициента фильтрации в приборах Г. Н. Каменского, Г. Тиме и Д. Капецкого

Номер прибора

Внутренний диаметр режущего кольца или цилиндра прибора

Площадь поперечного сечения образца F Длина пути фильтрации l [illegible]

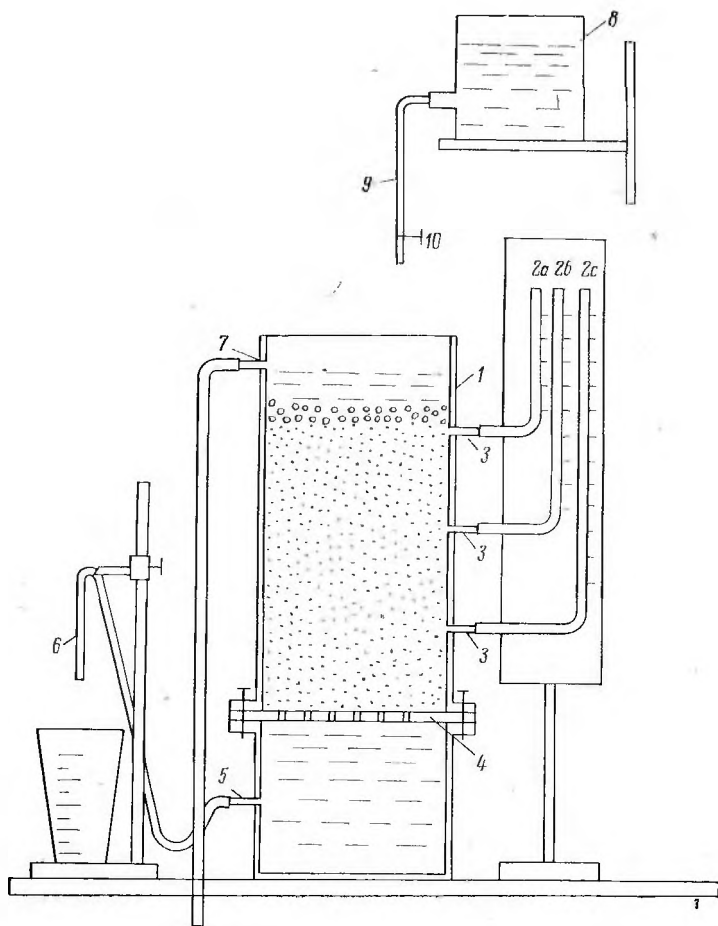


Рис. IV-9. Прибор Г. Тиме для определения коэффициента фильтрации.

сыщения породы водой при загрузке прибора и для регулирования напора и стока фильтрующейся воды во время опыта.

При опытах прибор устанавливают на столе; выше прибора на специальной подставке или полке устанавливают бутыл с тубусом 8, от которого отходит подводящая трубка 9, снабженная специальным зажимом 10. Резиновую регулирующую трубку 6 прибора укрепляют на штативе.

Последовательность определения

1. **Ход работы по определению коэффициента фильтрации в приборе Тиме тот же, что и в приборе Каменского.**

2. Загрузку породы в этом приборе производят непосредственно в рабочий цилиндр постепенно, слоями толщиной 3—5 см, и сопровождают трамбовкой и насыщением водой. По массе загруженной породы в цилиндр и его объему обязательно определяют плотность скелета породы.

3. Подготовив прибор к опыту, производят проверку работы пьезометров.

4. Далее соблюдают тот же порядок, как и при работе с прибором Каменского.

5. Расчет коэффициента фильтрации производят по формуле

$$K_f = Q \cdot 864 / (FI).$$

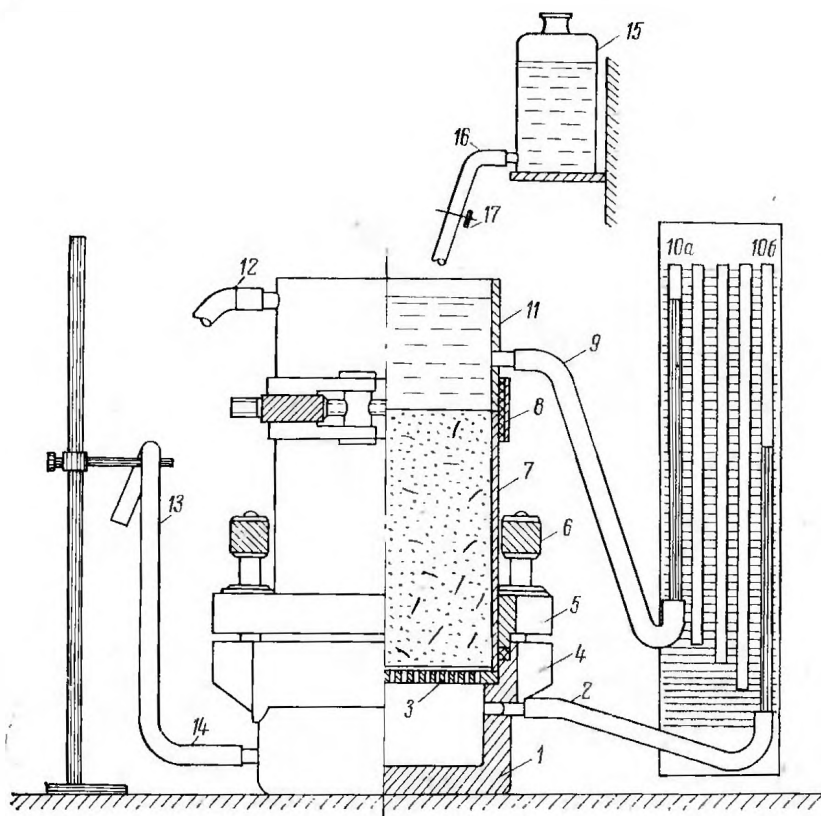
Прибор Д. Капецкого

Одним из приборов для определения коэффициента фильтрации песчаных и глинистых пород нарушенного и естественного сложения является прибор Капецкого. Этот прибор существенно модернизирован на кафедре инженерной геологии Ленинградского горного института. По принципиальной схеме работы он ничем не отличается от приборов Каменского и Тиме. Однако некоторые его конструктивные особенности дают более широкие возможности при испытаниях пород на фильтрацию.

При определении коэффициента фильтрации пород в приборе Капецкого необходимо иметь то же оборудование, что и при работе с приборами Каменского и Тиме.

Прибор Капецкого (рис. IV-10) состоит из распределительного резервуара 1, режущего цилиндра 7 и верхнего цилиндра 11. Распределительный резервуар 1 представляет собой стакан с глухим дном высотой и диаметром 11 см. В верхней части он имеет небольшую расточку, в результате которой образован круговой выступ. На выступе уложен латунный диск 3 с отверстиями, на который кладут металлическую сетку или марлю и устанавливают режущий цилиндр 7 с породой. С внешней стороны распределительного резервуара 1 напаяно кольцо 4 с четырьмя выступами, в которые заделаны болты 6. Болты служат для свинчивания распределительного резервуара 1 с кольцом 5, надеваемым на режущий цилиндр 7 и тем самым присоединяющим его к распределительному резервуару 1. Между соединительными кольцами 4 и 5 зажимается резиновая кольцевая прокладка, обеспечивающая плотную связь распределительного резервуара 1 с режущим цилиндром 7.

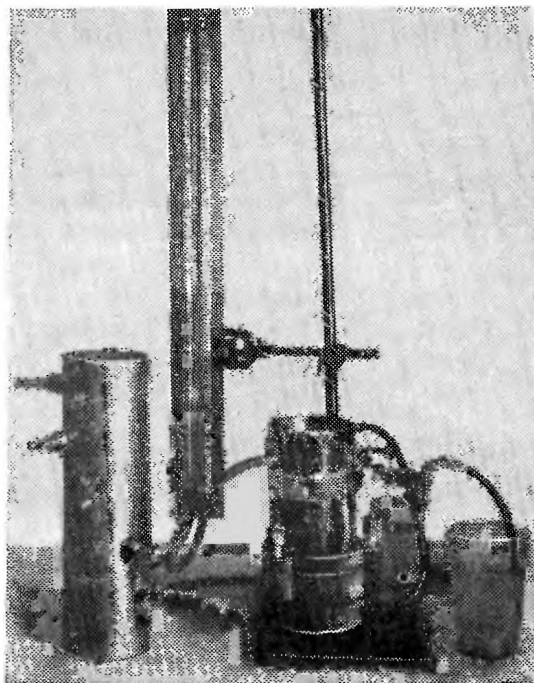
Распределительный резервуар 1 имеет два отвода 2 и 14, из которых один (2) соединен со стеклянным пьезометром 106, а второй (14) — с резиновой регулирующей трубкой 13.



„б“

Рис. IV-10. Прибор Д. Катенкова для определения коэффициента фильтрации.

а — схема; б — общий вид



Режущий цилиндр 7 представляет собой металлическое, обычно стальное, кольцо высотой и внутренним диаметром 10 см. Один край режущего цилиндра 7 остро отточен. Верхний цилиндр 11 имеет высоту 7 см и тот же диаметр, что и режущий цилиндр 7. Присоединяется он к режущему цилиндру 7 с помощью специальной кольцевой ленты 8, затягиваемой болтом поверх резиновой прокладки. Верхний цилиндр 11 имеет два отвода 9 и 12 со штуцерами, один из которых (9) через резиновую трубку присоединяется к стеклянному пьезометру 10а, а другой (12) служит для поддержания постоянного уровня воды в приборе. Стеклянные пьезометры 10а и 10б укреплены на деревянной панели, имеющей миллиметровую шкалу.

При испытаниях рыхлых пород (песков и др.) нарушенного сложения режущий цилиндр заменяется другим цилиндром высотой 40 см, который имеет несколько штуцеров, расположенных на равных расстояниях друг от друга по высоте. Эти штуцера резиновыми трубками соединяются с пьезометрами. В этом случае прибор Капецкого работает, как прибор Тиме.

При опытах прибор устанавливают на столе; выше прибора, на специальной подставке или полке, устанавливают бутыл с водой 15, имеющую тубус, от которого отходит подводящая трубка 16, снабженная зажимом 17. Резиновую регулируемую трубку 13 прибора укрепляют на штативе.

Последовательность определения

Ход работы по определению коэффициента фильтрации в приборе Капецкого соблюдается тот же, что и при работе с прибором Каменского. При испытаниях пород естественного сложения рабочей частью прибора служит режущий цилиндр 7, а при испытаниях пород нарушенного сложения режущий цилиндр заменяют сменным, более высоким, с дополнительными штуцерами. В этом случае следует обязательно определять плотность пород, при которой они будут подвергаться испытаниям на фильтрацию.

Трубка Г. Н. Каменского

Чрезвычайно простым методом определения коэффициента фильтрации песков является метод, разработанный Г. Н. Каменским, при котором коэффициент фильтрации определяют в приборе, получившем название трубки Каменского. При работе с этим прибором необходимо иметь: 1) трубку Каменского; 2) штатив или специальную металлическую подставку для трубки; 3) батарейный стакан; 4) секундомер; 5) трамбовку; 6) термометр; 7) журнал (см. табл. IV-6).

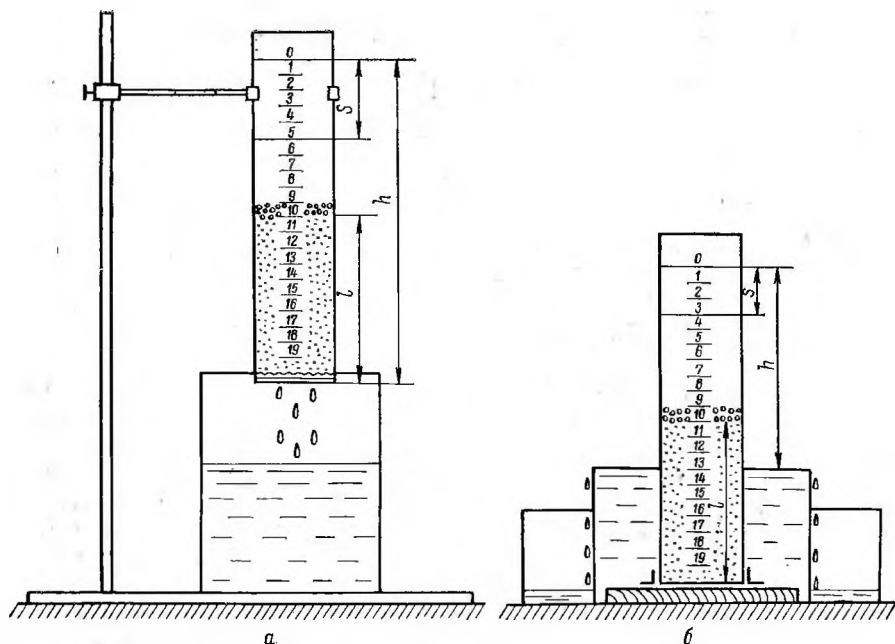


Рис. IV-11. Трубка Г. Н. Каменского.

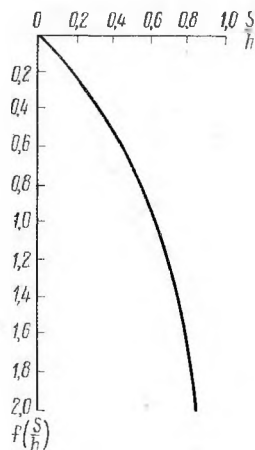
Трубка Каменского стеклянная, имеет длину 23—25 см и диаметр 2—4 см (рис. IV-11, а). На трубке сверху вниз нанесены деления через 1 см от 0 до 20. Деление 20 должно точно совпадать с нижним краем трубки, который обвязывают марлей или сеткой. Трубку укрепляют в штативе или устанавливают на специальной металлической подставке.

Последовательность определения

1. Трубку помещают в батарейную банку высотой 15—20 см и загружают испытуемым песком. Наполнение ее песком производят слоями по 2—3 см и сопровождают легкой трамбовкой и насыщением водой, для чего в батарейную банку приливают воды в таком количестве, чтобы уровень ее не превышал высоты слоя песка. Трубку загружают песком на высоту 10 см.

2. Когда песок будет полностью насыщен водой, в батарейную банку добавляют воды в таком количестве, чтобы уровень ее был выше уровня песка в трубке на 1—2 см, и ожидают момента, когда уровни воды в трубке и батарейной банке сравняются.

Рис. IV-12. График значений функции $f(S/h)$.



3. На утрамбованный и насыщенный песок в трубке насыпают гравий слоем 1—2 см для предохранения песка от размыва. Если испытуемый песок мелкозернистый и проходит через сетку, следует предварительно на сетку заложить буферный слой 1 см более крупного песка и на него загружать слой 10 см испытуемого песка.

4. На насыщенный водой песок наливают сверху воды до уровня 1—2 см выше нуля. Затем трубку быстро приподнимают над батарейной банкой и закрепляют на штативе или, быстро вынув трубку из батарейной банки, устанавливают ее в чашке на специальной металлической подставке.

5. Засекают секундомером время прохождения уровня воды в трубке от 0 до деления 5 (для малопроницаемого песка до деления 3).

6. Измеряют температуру воды.

7. На основании полученных данных вычисляют коэффициент фильтрации по формуле

$$K_f = (l/t) f(S/h),$$

где K_f — коэффициент фильтрации, см/с; l — длина пути фильтрации, см; t — время понижения уровня воды в трубке от 0 до деления 3 или 5, с; S — понижение уровня воды в трубке (см) за время t (с); h — первоначальный напор, см.

Величину $f(S/h)$ определяют по табл. IV-5 или графику (рис. IV-12).

Для ускорения вычислений коэффициента фильтрации на рис. IV-13 приведена номограмма Н. Н. Биндемана. Способ пользования этой номограммой следующий: приложив линейку к шкале S/h и к шкале времени t понижения уровня, получают на пересечении со шкалой коэффициента фильтрации K_f значение последнего.

8. Для приведения результатов опыта к постоянной температуре вычисляют и учитывают температурную поправку (см. § 11, п. 9).

9. Для получения среднего значения коэффициента фильтрации опыт повторяют несколько раз при различных значениях S , т. е. при различных понижениях уровня воды в трубке (см) за время t (с).

Т а б л и ц а IV-5. Значения функции $f(S/h)$

$\frac{S}{h}$	$f\left(\frac{S}{h}\right)$	$\frac{S}{h}$	$f\left(\frac{S}{h}\right)$	$\frac{S}{h}$	$f\left(\frac{S}{h}\right)$
0,01	0,010	0,36	0,446	0,71	1,238
0,02	0,020	0,37	0,462	0,72	1,273
0,03	0,030	0,38	0,478	0,73	1,309
0,04	0,040	0,39	0,494	0,74	1,347
0,05	0,051	0,40	0,510	0,75	1,386
0,06	0,062	0,41	0,527	0,76	1,427
0,07	0,073	0,42	0,545	0,77	1,470
0,08	0,083	0,43	0,562	0,78	1,514
0,09	0,094	0,44	0,580	0,79	1,561
0,10	0,105	0,45	0,598	0,80	1,609
0,11	0,117	0,46	0,616	0,81	1,661
0,12	0,128	0,47	0,635	0,82	1,715
0,13	0,139	0,48	0,654	0,83	1,771
0,14	0,151	0,49	0,673	0,84	1,833
0,15	0,163	0,50	0,693	0,85	1,897
0,16	0,174	0,51	0,713	0,86	1,966
0,17	0,186	0,52	0,734	0,87	2,040
0,18	0,198	0,53	0,755	0,88	2,120
0,19	0,210	0,54	0,777	0,89	2,207
0,20	0,223	0,55	0,799	0,90	2,303
0,21	0,236	0,56	0,821	0,91	2,408
0,22	0,248	0,57	0,844	0,92	2,526
0,23	0,261	0,58	0,868	0,93	2,659
0,24	0,274	0,59	0,892	0,94	2,813
0,25	0,288	0,60	0,916	0,95	2,996
0,26	0,301	0,61	0,941	0,96	3,219
0,27	0,315	0,62	0,967	0,97	3,507
0,28	0,329	0,63	0,994	0,98	3,912
0,29	0,343	0,64	1,022	0,99	4,605
0,30	0,357	0,65	1,050		
0,31	0,371	0,66	1,079		
0,32	0,385	0,67	1,109		
0,33	0,400	0,68	1,140		
0,34	0,416	0,69	1,172		
0,35	0,431	0,70	1,204		

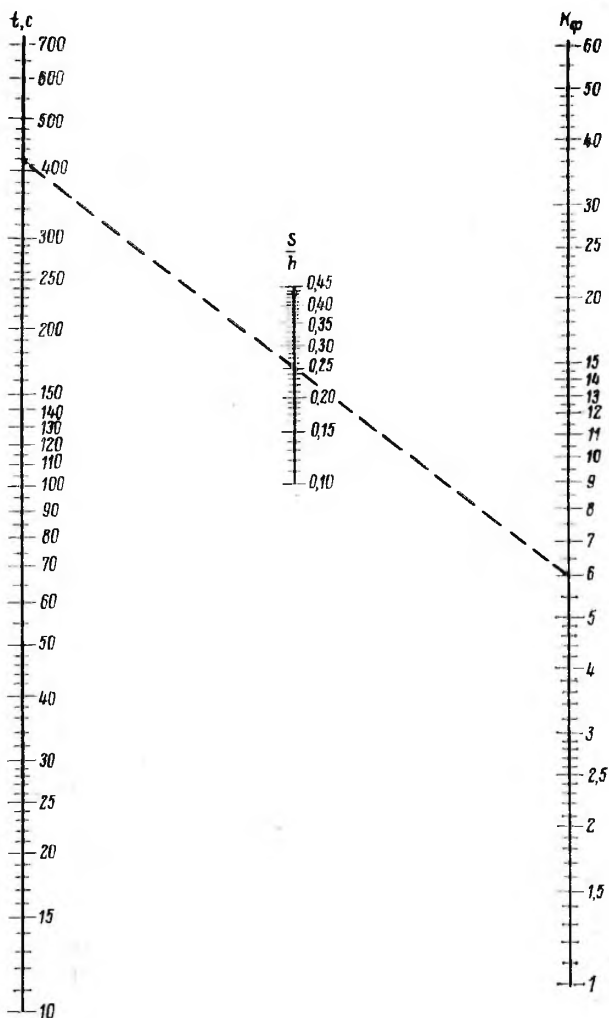


Рис. IV-13. Номограмма Н. Н. Биндемана для определения коэффициента фильтрации в приборе Г. Н. Каменского.

10. Для крупнозернистых песков опыт рекомендуется производить с меньшим напорным градиентом. С этой целью трубку с насыщенным песком и наполненную водой быстро вынимают из батарейной банки, помещают в наполненный водой стаканчик высотой около 10 см, который в свою очередь устанавливают в чашку или кристаллизатор. При такой установке первоначальный напор h должен измеряться не от 0 до деления 20, а от 0 до уровня воды в стаканчике, который должен оставаться все время на одной высоте, так как просачивающаяся вода будет стекать через край стаканчика (рис. IV-11, б).

11. Все данные, полученные в процессе опыта, и производимые вычисления коэффициента фильтрации записывают в журнал (табл. IV-6), а окончательный результат — в сводную таблицу (приложение 3).

Трубка СПЕЦГЕО

Трубка СПЕЦГЕО, сконструированная Е. В. Симоновым, предназначена для лабораторного определения коэффициента фильтрации песчаных и глинистых пород. В трубке СПЕЦГЕО имеется возможность, во-первых, вести испытания пород естественного сложения, что особенно важно для глинистых пород, и, во-вторых, вести испытания при постоянном градиенте, что важно для песчаных пород. Эти качества трубки позволяют рекомендовать ее для широкого применения в практике. Усовершенствованная модель трубки СПЕЦГЕО нашей промышленностью выпускается под маркой КФЗ. При определении коэффициента фильтрации необходимо кроме трубки иметь: 1) батарейную банку; 2) штатив; 3) часы-секундомер; 4) журнал (см. табл. IV-7).

Трубка СПЕЦГЕО (рис. IV-14) состоит из мерного цилиндра 1 и металлической фильтрационной трубки 3, снабженной крышками — верхней 2 и нижней 4. Мерный цилиндр 1 (стеклянный, объемом 150—180 см³) имеет суженное горлышко, соединяется с металлической трубкой через верхнюю крышку 2. На одной стороне мерного цилиндра 1 нанесена шкала. Фильтрационная трубка 3 представляет собой полый цилиндр диаметром 50—60 мм и длиной 110—120 мм. Один край этой трубки скошен и остро отточен. При испытаниях фильтрационную трубку наполняют породой. Верхнюю крышку 2 одним краем плотно надевают на трубку 3, а другим — на мерный цилиндр. Чтобы крышка плотно надевалась на трубку 3 и цилиндр 1, внутри ее имеются резиновые прокладки. Нижняя крышка 4 латунная, снабжена дырчатым донышком 5 и покрыта сеткой.

Усовершенствованная модель трубки СПЕЦГЕО (рис. IV-15)

Т а б л и ц а IV-6. Журнал для определения коэффициента фильтрации песка в трубке Г. Н. Каменского

Лабораторный номер	Номер опыта	Первоначальный напор h , см	Понижение уровня воды в трубке S , см	Время понижения уровня t , с	$\frac{S}{h}$	$t \left(\frac{S}{h} \right)$	Длина пути фильтрации l , см	Коэффициент фильтрации $K_{\Phi} = \frac{l}{t} \left(\frac{S}{h} \right)$	Температура t , °C	Температурная поправка $TP = 1 + \frac{+0,0337}{t} + \frac{+0,000221}{t^2}$	Коэффициент фильтрации при 10° C $K_{\Phi 10} = \frac{K_{\Phi} TP_{10}}{TP_t}$	Примечание

В усовершенствованной модели прибора мерный цилиндр I имеет поплавков (на рисунке не показан) с двумя клапанами: верхний не дает

Последовательность определения

2. При испытаниях песков нарушенного сложения на трубку 3 надевают крышку 4 и затем через верх наполняют ее песком. Затем на трубку надевают верхнюю крышку 2 и устанавливают ее в батарейную банку. Для песков важно знать, при какой плотности они подвергаются испытаниям на фильтрацию. Поэтому по массе загруженного песка в трубку 3 и ее объему вычисляют плотность скелета песка. При отсутствии специального задания коэффициент фильтрации песков следует определять при самом плотном и самом рыхлом сложении.

174

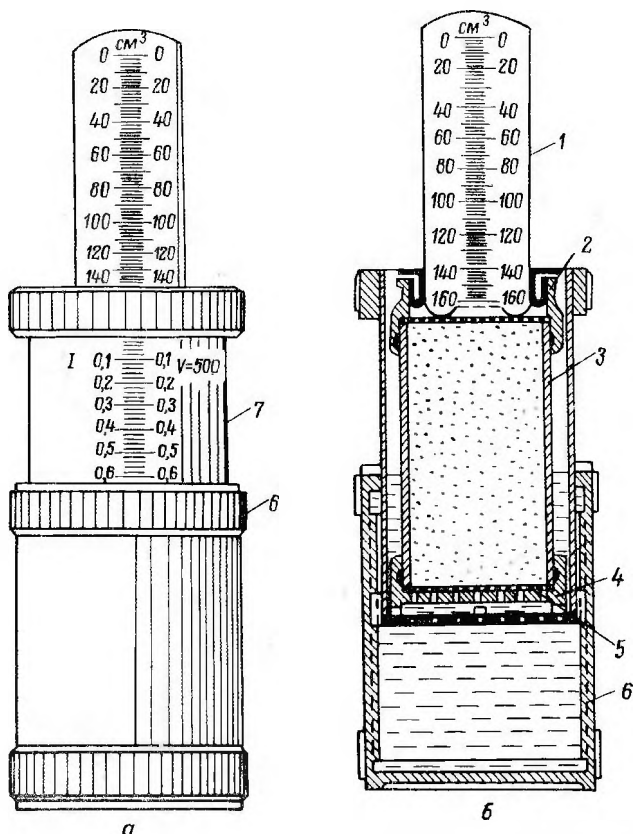


Рис. IV-15. Усовершенствованная модель трубки СПЕЦГЕО.
а — общий вид; б — в рабочем положении (в разрезе).

исходило постепенно. При испытаниях песков их насыщение водой лучше производить в процессе наполнения ими трубки. Для этого трубку устанавливают в батарейную банку и постепенно наполняют песком, при этом воду в банку приливают в таком количестве, чтобы слой воды в ней не превышал слоя песка в трубке. После того как вода появится в трубке над породой, насыщение ее заканчивают и приступают к испытаниям на фильтрацию.

4. При работе с усовершенствованным прибором СПЕЦГЕО наполнение фильтрационной трубки 3 породой производят способом, описанным выше, а насыщение водой — с помощью телескопического приспособления. Для этого в наружный стакан 6 наливают воды примерно на $\frac{1}{3}$ его высоты, а внутренний стакан 7 вывинчивают вверх до отказа. На дно стакана

7 устанавливают фильтрационную трубку 3 и медленно, с остановками, его завинчивают, опуская в нижнее положение, для насыщения породы водой, до появления пленки воды на ее поверхности.

5. Приподнимают фильтрационную трубку над батарейной банкой и закрепляют в штативе (или вывинчивают внутренний стакан 7 с фильтрационной трубкой вверх до отказа). Затем заполняют водой мерный цилиндр 1 и, быстро опрокинув его, укрепляют в верхней крышке 2 так, чтобы горлышко цилиндра опиралось непосредственно на породу. В таком виде мерный цилиндр работает как мариоттов сосуд, автоматически поддерживая над породой постоянный уровень воды в 1—2 мм. Как только этот уровень вследствие просачивания воды через породу понизится, в мерный цилиндр прорывается пузырек воздуха и вытекает соответствующее количество воды. Этим достигается постоянство напорного градиента, равного в обычной трубке единице, так как в данном случае напор равен пути фильтрации. В усовершенствованной трубке, если стакан 7 вывернуть вверх не до отказа, а оставить его частично затопленным в воде, то напорный градиент будет меньше единицы (см. шкалу на стакане 7), так как путь фильтрации, как и в обычной трубке, будет равен длине фильтрационной трубки, а напор — расстоянию от пленки воды над породой до уровня воды в наружном стакане 6.

6. Если в мерный цилиндр прорываются крупные пузырьки воздуха, это свидетельствует о том, что горлышко трубки стоит на значительном расстоянии от поверхности породы. В этом случае необходимо цилиндр опустить глубже и добиться, чтобы в него равномерно поднимались мелкие пузырьки воздуха.

7. По достижении указанных условий отмечают по шкале уровень воды в мерном цилиндре 1, пускают секундомер и по прошествии определенного времени t (50—100 с для более водопроницаемых и 250—500 с для менее водопроницаемых пород) замечают второй уровень воды в мерном цилиндре 1, что дает возможность определить расход воды Q , профильтровавшейся через породу за время t (с). Коэффициент фильтрации (см/с) при этом будет равен

$$K_{\phi} = Q/(tF),$$

где Q — общее количество профильтровавшейся воды (см³) за время t (с); F — площадь поперечного сечения металлической трубки, см².

Из формулы видно, что величина Q/F может быть заранее вычислена. Для этой цели на мерном цилиндре имеется вторая шкала, соответствующая различным отношениям Q/F . Поль-

Таблица IV-7. Журнал для определения коэффициента фильтрации породы в трубке СПЕЦГЕО

Лабораторный номер	Номер опыта	Напорный градиент	Поперечное сечение трубки F , см ²	Время t от начала наблюдения, с	Количество воды Q , прошедшей за время t , см ³	Коэффициент фильтрации $K_{\text{ф}} = Q/(tF)$, см/с	Температура воды t , °C	Температурная поправка $T_{\text{П}}$	Коэффициент фильтрации при температуре t , °C	Средний коэффициент фильтрации	Примечание

зование этой шкалой сводит к минимуму вычисления коэффициента фильтрации.

8. Для получения среднего значения коэффициента фильтрации повторяют измерения расхода воды при различных понижениях уровня воды в мерном цилиндре за время t (с). При работе с усовершенствованной трубкой опыт повторяют при данном градиенте 2—3 раза. Во время испытаний пород на фильтрацию измеряют температуру воды, вычисляют и учитывают температурную поправку.

9. Все данные, полученные в процессе опыта, и вычисления коэффициента фильтрации записывают в журнал (табл. IV-7), а окончательный результат — в сводную таблицу (приложение 3).

Компрессионно-фильтрационный прибор

Компрессионно-фильтрационные приборы наиболее часто применяют при исследовании глинистых пород, для которых необходимо определять влияние изменений плотности на фильтрационные свойства. Известно много конструкций таких приборов. Здесь дается описание принципиальной схемы устройства компрессионно-фильтрационных приборов и методики определения коэффициента фильтрации с помощью этих приборов. Описание некоторых конкретных типов приборов (приборы Н. Н. Маслова, Д. М. Знаменского — В. И. Хаустова и Ю. М. Абелева — А. Н. Озерецковского) приводится ниже, в конце § 11.

В зависимости от целей исследования коэффициент фильтрации в компрессионно-фильтрационном приборе может опре-

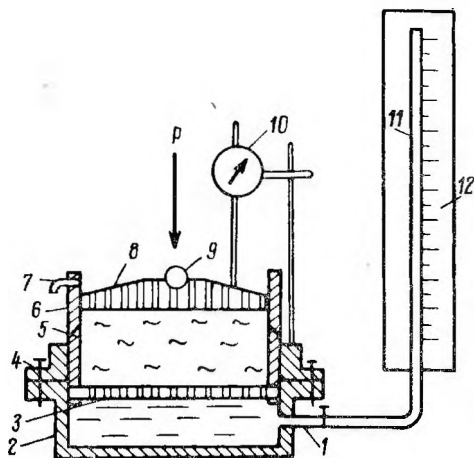


Рис. IV-16. Принципиальная схема конструкции компрессионно-фильтрационного прибора.

деляться по образцам естественного и нарушенного сложения. При этом необходимо иметь следующее оборудование: 1) компрессионно-фильтрационный прибор; 2) оборудование для определения влажности и плотности пород; 3) часы-секундомер; 4) термометр; 5) журнал (см. табл. IV-8).

Основной частью компрессионно-фильтрационного прибора (рис. IV-16) является база 2, представляющая собой массивный полый стакан. Внутри стакана, в верхней его части, на кольцевом выступе помещается металлическая решетка 3 с большим количеством отверстий. С боковой стороны стакана закреплен штуцер 1. На решетку 3 устанавливают кольцо 5, в которое загружают исследуемую породу. Кольцо к стакану притягивают болтами через фланцы 4, между которыми укладывают уплотнительную резиновую прокладку. На кольцо 5 навинчивают направляющий цилиндр 6, в верхней части снабженный сливной трубкой 7. Давление на исследуемую породу передается дырчатым штампом 8, имеющим с верхней стороны углубление для стального шарика 9; на него упирается шток прессы, под которым производят уплотнение породы. Для измерения деформации пород при уплотнении на специальной стойке укреплен индикатор 10.

К базе прибора 2 присоединяют стеклянную пьезометрическую трубку 11, служащую одновременно для питания прибора водой и для измерения действующего напора. Пьезометрическая трубка укреплена на деревянной панели 12 с миллиметровой шкалой.

Последовательность определения

1. Для определения коэффициента фильтрации пород естественного сложения и влажности монолит вскрывают и определяют его сохранность и пригодность для испытания. Он не должен иметь следов нарушения сложения — трещин, смятий и др.
2. Из монолита вырезают образец размером, точно соответ-

ствующим высоте и диаметру кольца 5. Вырезание образца выполняют режущим кольцом. После взятия образца породы кольцом его взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г для определения плотности породы (см. гл. III, § 3). Одновременно из монолита отбирают пробы для определения влажности породы и плотности ее минеральной части.

3. Перед сборкой прибора база прибора 2 заполняется водой через пьезометр до появления пленки воды на поверхности решетки 3. Решетку покрывают листом фильтровальной бумаги. Поверх фильтровальной бумаги на решетку осторожно устанавливают кольцо с породой, которое закрепляют на базе болтами через фланцы 4. Затем на кольцо навинчивают направляющий цилиндр, породу покрывают листом фильтровальной бумаги и на нее устанавливают штамп 8. На стойке закрепляют индикатор. В таком виде прибор, загруженный породой, подготовлен для испытания на фильтрацию.

4. Прибор устанавливают под пресс, рычаг которого с помощью уравнильного винта приводят в горизонтальное положение. Затем рычаг закрепляют неподвижно упорным винтом, а прибор заливают сверху водой без нагрузки на рычаг. Одновременно ножку индикатора ставят на штамп и производят запись показаний индикатора. Закрепление рычага предупреждает разбухание породы в приборе. Породу в приборе при закрепленном рычаге выдерживают до 5 сут для полного насыщения водой. При естественной степени насыщения породы водой более 0,95 можно приступить к испытаниям породы на фильтрацию без выдерживания после заливки водой.

5. При испытаниях пород естественного сложения образцы должны загружаться в прибор ориентированными, как в условиях естественного залегания.

6. При испытаниях породы нарушенного сложения ее размельчают и просеивают или протирают через сито с отверстиями 1 мм. За одни сутки до загрузки прибора из породы с водой приготавливают тесто консистенции предела текучести. Далее, так же как и при подготовке приборов для испытания породы естественного сложения, из приготовленного теста вырезают образец режущим кольцом. Затем прибор собирают, ставят под пресс и заливают водой. Одновременно производят запись показания индикатора.

7. Зарядив прибор испытуемой породой и выдержав ее под прессом до полного насыщения водой, приступают к определению коэффициента фильтрации. Сущность опыта состоит в определении скорости фильтрации воды через породу, предварительно уплотненную той или иной ступенью нагрузки. Число и размер ступеней нагрузок устанавливают до начала опыта в зависимости от предъявляемых требований. Обычно испытания проводят при нагрузках 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 МПа.

8. После насыщения породы водой прикладывают первую ступень нагрузки, равную 0,05 МПа. Под этой нагрузкой породу выдерживают до стабилизации уплотнения. Наблюдения за уплотнением ведут по индикатору.

9. После стабилизации уплотнения породы под действием первой, второй и последующих ступеней нагрузки в пьезометрическую трубку наливают воды на 50 см выше уровня сливной трубки прибора и создают тем самым напор, под действием которого вода начинает фильтроваться из пьезометрической трубки в прибор и в приборе снизу вверх через слой испытуемой породы. Одновременно ведут наблюдения за скоростью понижения уровня воды в пьезометрической трубке, для чего отсчеты по пьезометру производят через определенные промежутки времени в зависимости от водопроницаемости пород, но не реже двух раз в течение рабочего дня. Следует учитывать, что коэффициент фильтрации получится тем точнее, чем больше было сделано наблюдений за уровнем воды в пьезометрической трубке. Горизонт воды в приборе в процессе опыта необходимо поддерживать на уровне сливной трубки прибора. Если расход воды, фильтрующейся через породу, меньше потерь на испарение, то воду в направляющий цилиндр прибора подливают сверху до уровня сливной трубки.

10. Коэффициент фильтрации породы вычисляют по данным, полученным в процессе испытаний, исходя из условий, что уровень воды в пьезометрической трубке при первом отсчете через время t_1 (ч или с) от начала наблюдения понизился на S_1 (см) от первоначального уровня, через время t_2 — на S_2 (см), через время t_3 — на S_3 (см), через время t_i — на S_i (см), откуда по формуле Дарси

$$K_{\phi 1} = g_1 / (F I_1 t_1); \quad K_{\phi 2} = g_2 / (F I_2 t_2); \\ K_{\phi 3} = g_3 / (F I_3 t_3); \quad K_{\phi i} = g_i / (F I_i t_i),$$

где $K_{\phi 1}$, $K_{\phi 2}$, $K_{\phi 3}$, $K_{\phi i}$ — коэффициенты фильтрации, см/с; g_1 , g_2 , g_3 , g_i — количества воды (см³), профильтровавшейся через слой породы за время t_1 , t_2 , t_3 , t_i , определенные по формулам

$$g_1 = \frac{\pi d^2}{4} S_1; \quad g_2 = \frac{\pi d^2}{4} (S_2 - S_1); \quad g_3 = \frac{\pi d^2}{4} (S_3 - S_2); \\ g_i = \frac{\pi d^2}{4} (S_i - S_{i-1})$$

(где d — диаметр пьезометрической трубки, см); I_1 , I_2 , I_3 , I_i — гидравлические градиенты в моменты t_1 , t_2 , t_3 , t_i , равные

$$I_1 = \frac{h_1}{l}; \quad I_2 = \frac{h_2}{l}; \quad I_3 = \frac{h_3}{l}; \quad I_i = \frac{h_i}{l};$$

l — толщина испытуемого слоя породы (см) к моменту окончания стабилизации осадки от той или иной ступени нагрузки; h_1, h_2, h_3, h_i — средние действующие напоры за время t_1, t_2, t_3, t_i , равные

$$h_1 = h - \frac{S_1}{2}; \quad h_2 = h - \frac{S_2 - S_1}{2}; \quad h_3 = h - \frac{S_3 - S_2}{2};$$

$$h_i = h - \frac{S_i - S_{i-1}}{2};$$

h — начальный напор, см; F — площадь поперечного сечения кольца прибора, заполненного испытуемой породой, см².

Средний коэффициент фильтрации за время опыта при первой ступени нагрузки составит

$$K_{\phi} = (K_{\phi 1} + K_{\phi 2} + K_{\phi 3} + \dots + K_{\phi i})/i,$$

где i — число наблюдений.

В целях сокращения вычислений коэффициент фильтрации может быть определен с достаточной точностью по формуле

$$K_{\phi} = \left[f \left(\frac{S}{h} \right) / t \right] \frac{f_{\text{тр}}}{F} l \cdot 864,$$

где K_{ϕ} — коэффициент фильтрации, м/сут; $f(S/h)$ — функция, определяется по табл. IV-5 или по графику (см. рис. IV-12); S — понижение уровня воды в пьезометрической трубке (см) за время t (с); h — начальный напор, см; $f_{\text{тр}}$ — площадь сечения пьезометрической трубки, см²; F — площадь поперечного сечения кольца прибора, см²; l — длина пути фильтрации, равная толщине слоя породы в кольце (см) после стабилизации ее уплотнения от той или иной ступени нагрузки; 864 — коэффициент пересчета сантиметров в секунду на метры в сутки.

Для удобства вычислений вышеприведенная формула может быть записана в следующем виде:

$$K_{\phi} = AM,$$

где

$$A = f \left(\frac{S}{h} \right) / t; \quad M = 864 \frac{f_{\text{тр}}}{F} l.$$

Для каждого прибора значения A и M могут быть подготовлены в виде соответствующих таблиц.

Всего рекомендуется делать не менее трех вычислений коэффициента фильтрации при различных напорах для каждой

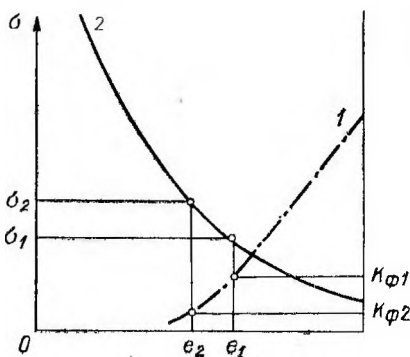


Рис. IV-17. График зависимости изменения коэффициента фильтрации (1) породы от изменения ее плотности (2) после уплотнения нагрузкой σ .

ступени нагрузки: в начале опыта, после падения уровня воды в пьезометрической трубке до половины первоначального напора и в конце опыта при самом малом напоре.

11. Вычислив значение коэффициента фильтрации при первой ступени нагрузки, опыт продолжают после стабилизации уплотнения породы от второй, третьей и последующих ступеней нагрузки.

12. При каждом измерении уровня воды в пьезометрической трубке производят замер температуры фильтрующейся воды. Для приведения результатов к одной постоянной температуре и получения значения коэффициента фильтрации при этой постоянной температуре вводят температурную поправку.

13. Чтобы получить полную характеристику изменения водопроницаемости породы в зависимости от ее плотности, после выполнения опытов на фильтрацию при разных напорах для каждой ступени нагрузки воду из прибора сливают, прибор разбирают, кольцо с породой с поверхности обтирают фильтровальной бумагой и взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г. После этого породу с кольцом помещают в термостат и высушивают при температуре 105 °С до постоянной массы. Все эти данные позволяют определить влажность породы, ее плотность и плотность скелета, а также пористость и коэффициент пористости.

14. Все наблюдения, выполняемые в процессе опытов, и вычисления коэффициента фильтрации записывают в журнал (табл. IV-8), а окончательные результаты — в сводную таблицу (приложение 3). Окончательные результаты полезно также сопровождать графиком, выражающим зависимость изменения коэффициента фильтрации породы от изменения ее плотности при уплотнении (рис. IV-17).

Т а б л и ц а IV-8. Журнал для определения коэффициента фильтрации породы в компрессионно-фильтрационном приборе

Лабораторный номер	Номер опыта	Нагрузка на породу, МПа	Толщина слоя породы в момент стабилизации осадки, см	Площадь поперечного сечения, см ²		Наблюдение		Продолжительность фильтрации, мин	Начальный напор h , см	Понижение уровня воды в пьезометре S (см) за время t
				кольца прибора	пьезометра	Дата	Время			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

П р о д о л ж е н и е

Средний действующий напор за время t $h_t = h - \frac{S_t - S_{t-1}}{2}$	Гидравлический градиент в момент t $I = \frac{h}{l}$	Расход воды (см ³) за время t $q = \frac{\pi d^2}{H} (S_t - S_{t-1})$	Коэффициент фильтрации, см/с $K_\Phi = \frac{q}{F I t}$	Температура t , °C	Поправка на температуру T_P	Коэффициент фильтрации при температуре t	Средний коэффициент фильтрации $K_\Phi = \frac{K_{\Phi 1} + K_{\Phi 2} + \dots + K_{\Phi i}}{i}$	Примечание
12	13	14	15	16	17	18	19	20

Прибор ПВ

Прибор ПВ (прибор для исследования водопроницаемости) конструкции Д. М. Знаменского и В. И. Хаустова является компрессионно-фильтрационным. Он выпускается нашей промышленностью и широко используется в производственных и исследовательских лабораториях. Этот прибор предназначен для определения водопроницаемости главным образом глинистых пород. Конструктивные особенности его таковы, что он позволяет определять коэффициент фильтрации породы при восходящем и нисходящем потоке воды с переменным напором. При работе с прибором ПВ необходимо иметь: 1) оборудование для определения влажности и плотности пород; 2) часы-секундомер; 3) журнал (см. табл. IV-8).

Прибор ПВ (рис. IV-18) состоит из цилиндрического корпуса 1 и крышки 14, которая прижимается к корпусу с помощью откидных болтов 13. В нижней части корпуса установлен двухходовой кран 17 для подачи воды в корпус прибора. Крышка 14 снабжена двумя пьезометрическими трубками 11 и 9 с трехходовыми кранами 12 и 6. Пьезометры 11 и 9 закреплены на стойке 10, по которой ходит указатель-движок 8 для фиксации уровня воды в пьезометрах. В нижнюю часть стойки вмонтирован термометр для измерения температуры воды при опытах. Через крышку 14 по резьбе и сальнику проходит арретирный винт 5, сдерживающий набухание породы при насыщении ее водой. Внутри винта 5 проходит шток 7, который служит для передачи вертикальной нагрузки на породу через поршень 4.

Испытуемую породу загружают в режущее кольцо 3 (площадь 40 см², диаметр 124 мм, высота 20 или 40 мм), вставляемое в направляющий цилиндр-вкладыш 15; режущее кольцо устанавливается вместе с вкладышем 15 на металлическую решетку 2 дна 16 вкладыша. Благодаря герметичности установки кольца с вкладышем между дном 16 вкладыша и крышкой 14 при движении воды через породу внутри корпуса прибора создается два бьефа: внутренний а и внешний б. Для соединения обоих бьефов на крышке прибора установлен кран (на рисунке не показан).

Последовательность определения

1. Ход работы по определению коэффициента фильтрации в приборе ПВ в значительной степени сохраняется таким же, как при работе с компрессионно-фильтрационными приборами. Поэтому необходимо ознакомиться с работой этих приборов (см. гл. V, § 5).
2. Вырезку образца породы из монолита естественного

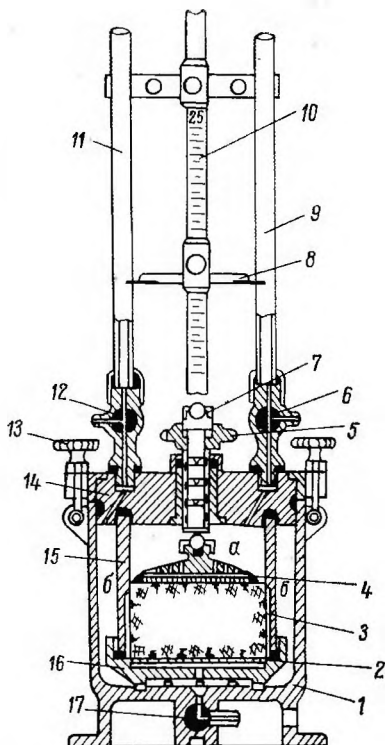
Рис. IV-18. Прибор ПВ.

сложения или из приготовленного теста нарушенного сложения производят кольцом 3 режущим способом, описанным выше. После взятия образца кольцом его взвешивают для определения плотности породы до опыта, одновременно из монолита берут пробы для определения влажности и плотности минеральной части породы.

3. Кольцо с породой соединяют с направляющим цилиндром-вкладышем и устанавливают на дно вкладыша. Предварительно на решетку дна вкладыша укладывают смоченный лист фильтровальной бумаги. Сверху на породу также укладывают смоченный лист фильтровальной бумаги, на который ставят поршень.

4. Собранные таким образом кольцо с вкладышем, дно и поршень устанавливают внутри корпуса прибора, закрывают его крышкой, которую плотно прижимают к корпусу откидными болтами 13.

5. Приступают к заливке прибора и насыщению породы водой, соблюдая следующий порядок. Арретирным винтом закрепляют поршень прибора для предупреждения набухания породы при ее увлажнении. К крану 17 резиновым шлангом подводят воду от бутылки с тубусом, которую устанавливают на уровне верхних концов пьезометров (см. рис. IV-19). Кран 12 открывают и пускают воду в прибор. Когда вода появится в левом пьезометре 11, кран 12 закрывают и, наклонив немного в противоположную сторону прибор, дают возможность выйти воздуху из бьефа б. Прибор в таком наклонном положении оставляют до появления воды в правом пьезометре 9, соединенном с бьефом а. При появлении воды в пьезометре 9 надо закрыть кран б и прибор наклонить в противоположную сторону, чтобы окончательно удалить воздух из внутреннего бьефа а. После удаления воздуха из прибора оставить его в покое на сутки для полного насыщения породы водой. Полноту



насыщения породы водой проверяют по стабилизации уровней воды в пьезометрах.

6. После полного насыщения породы водой приступают к испытаниям ее на фильтрацию. В приборе ПВ испытание можно вести по схеме «восходящего потока» (рис. IV-19, а) и по схеме «нисходящего потока» (рис. IV-19, б).

7. При испытании породы по схеме «восходящего потока» прибор подготавливают так, как показано на рис. IV-19, а. Кран 17 закрывают. Кран 6 открывают и на него надевают шланг для слива воды. Под шланг подставляют банку. Под шланг подставляют банку. К крану 12 шлангом подводят воду от бутылки с тубусом для периодического наполнения пьезометра водой при повторных испытаниях. После того как будет открыт кран 6 и из пьезометра 9 стечет вода, столб воды в пьезометре 11 создаст напор, под действием которого вода начнет фильтроваться из пьезометра в бьеф б и затем снизу вверх через породу. Для того чтобы измерить скорость фильтрации воды, ведут наблюдения за скоростью понижения уровня в пьезометре 11. Отсчеты по пьезометру производят через определенные промежутки времени, но

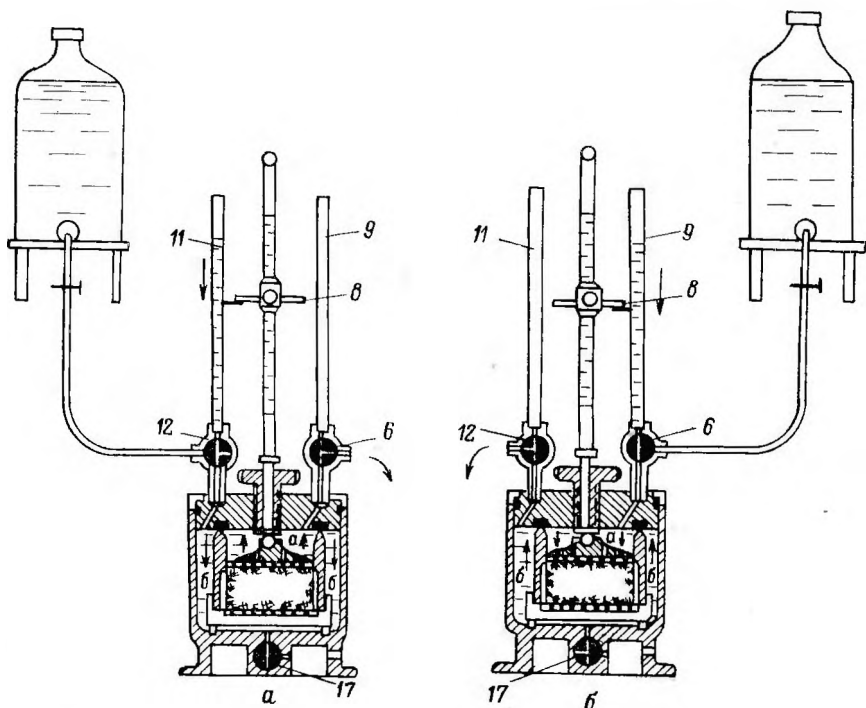


Рис. IV-19. Схема работы прибора ПВ.

не реже двух раз в течение рабочего дня. Опыт в восходящем потоке повторяют два-три раза.

8. При испытании породы по схеме «нисходящего потока» прибор приготавливают так, как показано на рис. IV-19, б. Наблюдения за скоростью фильтрации воды в этом случае ведут по скорости понижения уровня воды в пьезометре 9.

9. Испытания пород на фильтрацию в приборе ПВ можно производить как без предварительного уплотнения (но сдерживая набухание пород при их увлажнении), так и после уплотнения той или иной ступенью нагрузки.

10. После испытания породы на фильтрацию надо слить из прибора воду через краны 17, 12, 6, а затем выполнять дальнейшие определения (влажности, плотности породы) и вычисления коэффициента фильтрации, как и при работе с компрессионно-фильтрационным прибором.

11. Все наблюдения, выполненные в процессе опытов, и вычисления коэффициента фильтрации записывают в журнал (см. табл. IV-8). В графе «Примечание» журнала необходимо отмечать для каждого номера опыта, при каком (восходящем или нисходящем) потоке производилось испытание породы на фильтрацию.

Прибор Ю. М. Абелева и А. Н. Озерецковского

Методика определения коэффициента фильтрации глинистых пород в компрессионно-фильтрационных приборах не может считаться совершенной. Дефекты этой методики состоят в следующем:

1) существующая конструкция компрессионно-фильтрационных приборов не исключает возможности утечки воды в обход испытываемого слоя породы через зазоры между кольцом и стенками прибора;

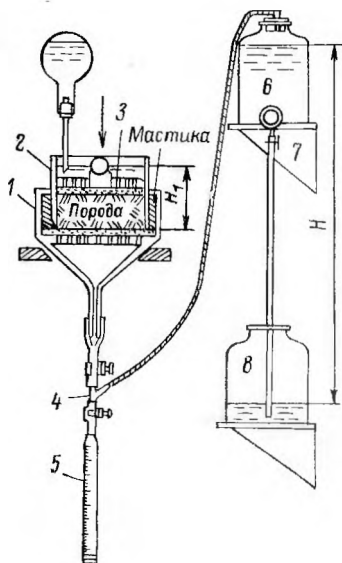
2) измерение расхода воды по скорости понижения ее уровня в пьезометрической трубке не дает возможности установить величину утечки воды, и фактически измеряется суммарная величина фильтрации через испытуемый слой породы и в его обход;

3) при подаче воды снизу вверх пузырьки воздуха на нижней поверхности испытываемого слоя породы препятствуют фильтрации воды через породу и искажают результаты испытаний.

В приборе конструкции Ю. М. Абелева и А. Н. Озерецковского эти недостатки в значительной мере устранены. Устройство этого прибора следующее (рис. IV-20).

На кронштейне установлена металлическая воронка 1. Внутри воронки на ее дырчатой перегородке поверх сетки или слоя песка помещают металлический цилиндр 2. Цилиндр состоит из двух деталей: режущего кольца (высотой 20—30 мм, диамет-

Рис. IV-20. Схема прибора конструкции Ю. М. Абелсва и А. Н. Озерецковского для определения водопроницаемости глинистых пород.



ром 70—80 мм), в которое помещают испытуемую породу, и направляющего кольца, служащего для обеспечения направления движения штампа, передающего давление на породу, и для поддержания постоянного уровня фильтрующейся воды. В цилиндре на образец породы устанавливают дырчатый штамп 3. Нагрузка на штамп передается от рычажного пресса через шарик, помещенный в углублении на штампе. На специальном штативе над штампом закрепляют индикатор, позволяющий вести наблюдения за осадкой породы при ее уплотнении.

К нижней части воронки 1 через тройник 4 присоединяется бюретка 5, служащая для измерения объема воды, профильтровавшейся через породу. От другого конца тройника 4 идет трубка к бутылке 6 с тубусом, наполненной водой и помещенной на полке на заданной высоте. Эта трубка проходит в горло бутылки, где ее герметически закрепляют в просверленной пробке. От тубуса этой бутылки 6 идет резиновая трубка ко второй бутылке 8, поставленной внизу. Если открыть кран 7, то через трубку вода может стекать из верхней бутылки 6 и создавать в ней разрежение, равное высоте столба воды H между уровнями воды в бутылках 6 и 8.

Так как верхняя бутылка 6 соединена с воронкой прибора 1 через трубку, то разрежение воздуха создается и в нижней части воронки, и фильтрация воды через породу происходит под влиянием вакуума, соответствующего высоте столба воды H . Высоту H можно изменять опусканием верхней бутылки или поднятием нижней.

Последовательность определения

1. Вырезание образца породы производят режущим кольцом. Породу в кольце покрывают фильтровальной бумагой, предварительно смоченной водой, и свинчивают кольцо с цилиндром. Затем цилиндр-кольцо устанавливают в воронке на решетку, которую покрывают сеткой или слоем отсортированного среднезернистого песка толщиной 0,5—1 см. Пространство

между стенками воронки и стенками цилиндра-кольца заливают расплавленной менделеевской мастикой или парафином, как это показано на рис. IV-20. Произведя загрузку прибора породой и выдержав ее залитой водой под прессом при закреплённом рычаге до полного насыщения водой, прикладывают первую ступень нагрузки, равную 0,05 МПа.

2. После стабилизации уплотнения породы от первой, второй и дальнейших нагрузок в цилиндр прибора наливают воды до определенного уровня. Для поддержания этого уровня постоянным в течение всего опыта, выполняемого для определения фильтрации, над цилиндром устанавливают колбочку с водой, опрокинутую вверх дном так, как это показано на рис. IV-20. При такой установке колбочка автоматически поддерживает постоянный уровень воды. Как только этот уровень понизится вследствие просачивания воды через породу, в колбочку прорывается пузырек воздуха и соответствующее количество воды вытекает из нее. Этим достигается постоянство уровня в цилиндре прибора.

3. Открывают кран 7 на трубке, соединяющей верхнюю бутылку 6 с нижней 8. Вода из верхней бутылки начнет стекать в нижнюю. В результате в верхней бутылке и соответственно в нижней части прибора будет создано разрежение, под влиянием которого начнется фильтрация воды. Вода, профильтровавшаяся через породу, будет стекать в бюретку в нижней части воронки.

4. Коэффициент фильтрации породы по данным, полученным в процессе опыта, вычисляют по формуле

$$K_{\phi} = g/(FIt),$$

где K_{ϕ} — коэффициент фильтрации, см/с (рекомендуется делать не менее трех вычислений коэффициента фильтрации при различных напорах для каждой ступени нагрузки); g — измеренное бюреткой количество воды (см³), профильтровавшей через слой породы за время t , с; F — площадь поперечного сечения кольца прибора, см²; I — гидравлический градиент:

$$I = (H + H_1)/l,$$

$H + H_1$ — действующий напор (см. рис. IV-20); l — толщина испытуемого слоя породы к моменту окончания стабилизации осадки от нагрузки, см.

5. В процессе опыта производят измерение температуры фильтрующейся воды, и при вычислении коэффициента фильтрации вводят температурную поправку.

§ 12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ПЕСКОВ ПО ДАННЫМ ИХ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И ПОРИСТОСТИ

Фильтрационные свойства песков, как известно, существенно изменяются в зависимости от их гранулометрического состава и пористости. В соответствии с этим делались многочисленные попытки установить зависимость изменения их коэффициента фильтрации от гранулометрического состава и пористости. В результате таких исследований были выведены и предложены многочисленные (более 20) эмпирические формулы. Эти формулы обычно дают совершенно неточные и несопоставимые результаты. Кроме того, каждая эмпирическая формула имеет узкие пределы применимости — для определенного состава и состояния породы и условий ее работы. Поэтому в настоящее время определение коэффициента фильтрации по эмпирическим формулам совершенно нецелесообразно, тем более что имеются простые и удобные приборы для непосредственного испытания песков на фильтрацию.

Ниже в качестве примера и только с методической целью приводятся формула Хазена и пример вычисления коэффициента фильтрации песка по его гранулометрическому составу. Формула Хазена имеет вид

$$K_{\phi} = C d_{10}^2 (0,7 + 0,03t),$$

где K_{ϕ} — коэффициент фильтрации, м/сут; C — эмпирический коэффициент «чистоты и однородности» песков (для чистых и однородных песков C изменяется от 1200 до 800, для загрязненных глинистых и неоднородных песков от 800 до 400); d_{10} — действующий диаметр зерна, мм, определенный одним из способов, указанных в гл. II, § 4; $0,7 + 0,03t$ — температурная поправка, по Хазену.

Формула Хазена применима для песков, действующий диаметр зерна которых изменяется в пределах от 0,1 до 3,0 мм и коэффициент неоднородности не превышает 5.

Если коэффициент фильтрации выразить не в метрах в сутки, а в сантиметрах в секунду и для среднезернистых песков коэффициент C принять равным 864, формула Хазена примет вид

$$K_{\phi} = 864 d_{10}^2 (0,7 + 0,03t) \cdot 100 / 86400 = d_{10}^2 (0,7 + 0,03t).$$

При температуре фильтровавшейся воды 10 °С температурная поправка равна единице, тогда

$$K_{\phi} = d_{10}^2.$$

§ 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ПО ВРЕМЕНИ, НЕОБХОДИМОМУ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ИХ ЗАДАННОЙ НАГРУЗКОЙ

Уплотнение глинистой горной породы, полностью насыщенной водой, возможно только при условии выжимания воды из пор породы, так как минеральные частицы, слагающие ее скелет, и вода, заполняющая ее поры, практически несжимаемы.

Скорость выжимания воды, а следовательно, и скорость уплотнения породы зависят от ее водопроницаемости. Поэтому уплотнение породы, насыщенной водой, заканчивается не сразу после приложения нагрузки, а занимает определенное время, необходимое для выжимания воды из ее пор. Это время называют гидродинамическим отставанием. У песчаных пород (при опытах в лабораторных условиях) оно измеряется минутами, реже часами, у глинистых — сутками и месяцами. В условиях естественного залегания глинистых пород значительной мощности такое их уплотнение протекает годами, десятками лет и более.

Изучая процесс уплотнения глинистых пород, насыщенных водой, можно определить коэффициент фильтрации по времени, необходимому для уплотнения их заданной нагрузкой. Иногда этот метод называют методом консолидации, так как он учитывает время уплотнения породы. Применим этот метод преимущественно для глинистых пород. Точность его меньше, чем прямых методов, описанных выше, но достаточная для практических целей. Для песчаных пород этот метод неприменим, так как в связи со значительной их водопроницаемостью вести наблюдения за временем уплотнения с достаточной точностью затруднительно.

Сущность этого метода состоит в следующем. Представим себе, что порода, насыщенная водой, уплотняется в кольце компрессионно-фильтрационного прибора постоянной нагрузкой σ . При стабилизации уплотнения породы в течение времени t будет выжато определенное количество воды. Вычислим, чему равен коэффициент фильтрации породы в процессе ее уплотнения.

Для удобства все вычисления отнесем не к полной высоте (мощности) слоя породы h , а к уменьшенной h_0 , которую порода имела бы при наименьшей пористости. Эта высота, называемая приведенной, близка к высоте минеральной части (скелета) породы и в процессе сжатия практически остается неизменной. Так как объем минеральной части в 1 см^3 породы равен $1/(1+e)$, то приведенная высота слоя породы будет равна

$$h_0 = h/(1+e).$$

Коэффициент фильтрации породы, отнесенный к приведенной высоте слоя, будет равен

$$K_{\Phi}^0 = K_{\Phi} / (1 + e).$$

Согласно закону Дарси количество воды, выжатое из породы в процессе уплотнения, должно быть равно

$$Q = K_{\Phi}^0 [(H_2 - H_1) / l] t F,$$

где $H_2 - H_1$ — действующий напор в поровой воде (для рассматриваемого случая он вызван постоянно действующей нагрузкой σ и равен $H_2 - H_1 = \sigma / \rho_v$, где ρ_v — плотность воды); l — путь фильтрации воды, для рассматриваемого случая наименьший путь фильтрации равен нулю, наибольший $h_0/2$, так как в компрессионно-фильтрационных приборах фильтрация воды происходит в две стороны — вверх и вниз; средний путь фильтрации равен

$$l = (1/2) (0 + h_0/2) = h_0/4;$$

F — площадь кольца прибора, см².

Введя соответствующие обозначения в формулу Дарси, будем иметь

$$Q = K_{\Phi}^0 [4\sigma / (h_0\rho_v)] Ft.$$

Так как $\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$, то

$$Q = K_{\Phi}^0 [4(\sigma_2 - \sigma_1) / (h_0\rho_v)] Ft.$$

Объем выжатой из породы воды в процессе уплотнения может быть определен иначе. В единице объема породы объем пор равен $e/(1+e)$. В породе, насыщенной водой, объем пор равен объему воды. При увеличении нагрузки на породу от σ_1 до σ_2 соответственно уменьшится коэффициент ее пористости от e_1 до e_2 и объем выжатой воды при этом должен быть равен

$$Q = \frac{e_1}{1 + e_1} hF - \frac{e_2}{1 + e_2} h'F,$$

где h' — высота слоя породы, соответствующая коэффициенту пористости e_2 .

Так как $h/(1+e_1)$ и $h'/(1+e_2)$ равны приведенной высоте слоя породы h_0 , остающейся постоянной во все время уплотнения породы, то можно написать

$$Q = (e_1 - e_2) h_0 F.$$

Приравняв это выражение к уравнению, выведенному по формуле Дарси, будем иметь

$$K_{\Phi}^0 = [4(\sigma_2 - \sigma_1) / (h_0\rho_v)] tF = (e_1 - e_2) h_0 F,$$

откуда

$$K_{\Phi}^0 = [(e_1 - e_2) / (\sigma_2 - \sigma_1)] [h_0^2 \rho_v / (4t)].$$

Так как

$$(e_1 - e_2)/(\sigma_2 - \sigma_1) = a,$$

$$K_\Phi = K_\Phi^0(1 + e),$$

будем иметь

$$K_\Phi = ah_0^2(1 + e)\rho_v/(4t).$$

Если коэффициент фильтрации отнести к полной высоте слоя породы h , то

$$K_\Phi = ah^2\rho_v/[4(1 + e)t],$$

откуда время t , необходимое для уплотнения слоя породы высотой (мощностью) h при увеличении нагрузки от σ_1 до σ_2 , будет равно

$$t = ah^2\rho_v/[4(1 + e)K_\Phi].$$

Известно, что если общее сжатие породы от данной нагрузки принять равным 100 %, то в первое сравнительно короткое время происходит наибольшее ее уплотнение, равное примерно 80—85 % от общей величины сжатия при данной нагрузке. Дальнейшее изменение величины сжатия происходит весьма медленно. Например, из графиков, показывающих зависимость осадки от времени для глинистой породы, приведенных на рис. IV-21, видно, что осадка на 80—85 % от полной для всех четырех ступеней нагрузок заканчивается в течение первых 2,5—5 ч наблюдений. В соответствии с этим для вычисления коэффициента фильтрации косвенным путем может быть рекомендована следующая формула:

$$K_\Phi = 0,85ah^2\rho_v/[4(1 + e)t'],$$

где 0,85 — коэффициент, учитывающий эффект времени, израсходованного на вытекание воды из породы; a — коэффициент сжимаемости, $\text{см}^2/\text{кгс}$ (Па^{-1}) (см. гл. V, § 1):

$$a = (e_1 - e_2)/(\sigma_2 - \sigma_1)$$

(где e_1 — начальный коэффициент пористости породы, соответствующий нагрузке σ_1 ; e_2 — конечный коэффициент пористости породы, соответствующий конечной нагрузке σ_2); h — высота слоя породы, загруженной в кольцо компрессионно-фильтрационного прибора, см; ρ_v — плотность воды, равная $0,001 \text{ кг/см}^3$, e — среднее значение коэффициента пористости за время сжатия:

$$e = (e_1 + e_2)/2;$$

t' — время (с), протекшее до завершения наибольшего уплотнения породы от общей величины сжатия при нагрузке σ_2 .

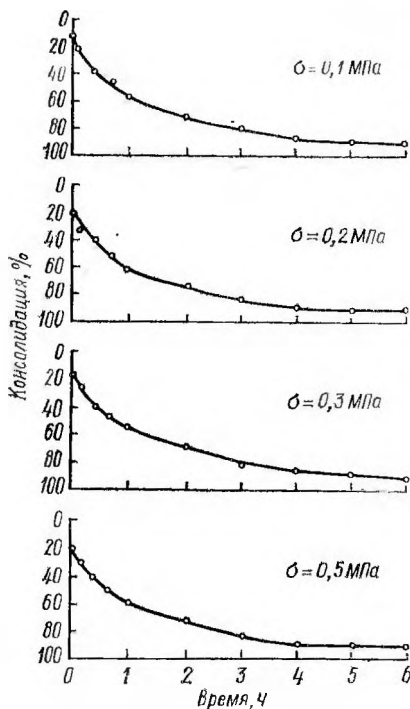


Рис. IV-21. Графики консолидации, показывающие зависимость осадки от нагрузки во времени.

При использовании этой формулы значения коэффициента сжимаемости и коэффициента пористости определяются экспериментально, значения h и ρ_b известны, а время t' определяется особым графическим методом следующим образом.

1. На графике, показывающем зависимость осадки от времени (рис. IV-22), устанавливают время t_1 и t_2 , протекающее от начала приложения нагрузки σ_2 до моментов, соответствующих сжатию образца на 90, 80 и 70 % от полного сжатия S , а также на 45, 40 и 35 % от S .

2. Составляют соотношения времен t_1/t_2 , т. е. 90/45; 80/40; 70/35 и т. д.

3. По значениям этих соотношений на том же графике, показывающем зависимость осадки от времени, строят кривую в произвольном горизонтальном масштабе.

4. На построенной кривой определяют точку, соответствующую значению $t_1/t_2 = 5,27$, и проводят из нее горизонтальную прямую до пересечения с кривой сжатия. Абсцисса точки пересечения и будет равна искомому времени t' .

Таким образом, из изложенного видно, что для определения коэффициента фильтрации косвенным путем по времени, необходимому для уплотнения породы заданной нагрузкой, надо иметь результаты компрессионных испытаний породы в виде: 1) графиков консолидации, показывающих зависимость осадки от времени; 2) компрессионной кривой, показывающей зависимость изменения пористости от давления (см. гл. V). Эти данные могут быть получены в результате специальных компрессионных испытаний только для определения коэффициента фильтрации или же они могут быть использованы попутно в связи с компрессионными испытаниями породы для других целей, например для оценки сжимаемости породы.

В том и другом случае испытания породы производят в компрессионно-фильтрационных приборах в соответствии с мето-

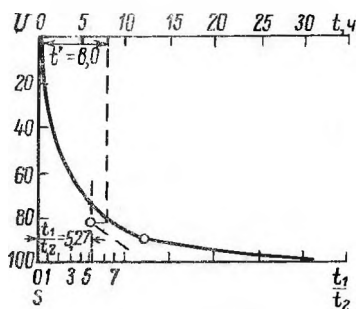


Рис. IV-22. График консолидации для определения времени t' .

дикой, изложенной в гл. V. При этом, когда по компрессионным испытаниям предполагают вычислять коэффициент фильтрации, наблюдения за уплотнением породы при каждой ступени нагрузки производят через следующие интервалы: 1, 3, 5, 10, 20, 30, 45, 60 мин и далее через 1 ч до конца рабочего времени; впоследствии — один раз в сутки. В результате таких наблюдений графики консолидации представляется возможным строить более точно.

Получив данные компрессионных испытаний, вычисляют коэффициент фильтрации, для чего строят дополнительную кривую по значениям отношения t_1/t_2 и определяют время t' . Кривую консолидации для определения времени t' выбирают соответствующую той ступени нагрузки, которая отвечает предъявляемым требованиям или работе породы в условиях ее естественного залегания.

§ 14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Проницаемость чаще определяют для пород скальных и полускальных, реже для различных песков и глин. Как известно, за абсолютную (физическую) проницаемость горных пород принимается газопроницаемость экстрагированных (очищенных от органического содержимого) кернов. Исследование ее производят на стандартной установке для определения газопроницаемости образцов пород под давлением. Такую установку наша промышленность выпускает под маркой АКМ-2. Старая модель имела марку УМПК-IV. Установка АКМ-2 предназначена для определения проницаемости образцов горных пород (кернов) жидкостями, газами и смесью жидкостей и газов, а также для определения зависимости проницаемости от температуры, пластового давления и горного давления. В состав установки АКМ-2 входит аппарат ГК-2 для определения газопроницаемости кернов под давлением в единицах проницаемости — дарси ($1Д \approx 1 \text{ мкм}^2$).

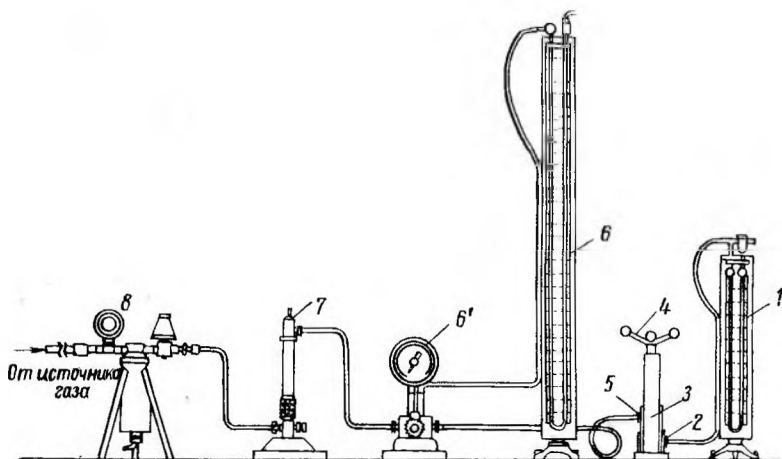


Рис. IV-23. Аппарат ГК-2.

Аппарат ГК-2 (рис. IV-23) состоит из винтового зажима 4 с кернодержателем 3 и реометром 1 для измерения расхода газа через образец, ртутного манометра 6 или образцового манометра 6' для измерения давления на входе газа в образец, хлоркальциевой трубки 7, служащей для просушки газа, протекающего через образец, редукционных регуляторов давления 8, регулирующих расход газа, источника газа — баллона со сжатым азотом или воздухом.

Последовательность определения

1. Из монолита горной породы вырезают образец цилиндрической формы высотой 30 мм и диаметром 20—30 мм. Для определения проницаемости слоистых пород изготавливают два образца: один с высотой, перпендикулярной к слоям, а второй с высотой, параллельной им. Образцы экстрагируют от нефти и солей, высушивают при температуре 105 °С.

2. Подготовленный образец породы вставляют в коническую резиновую пробку и вместе с ней помещают в стакан кернодержателя, который зажимают винтовым зажимом 4 между верхней и нижней крышками кернодержателя.

3. Через штуцер 5 в верхней крышке кернодержателя к образцу подают осушенный в хлоркальциевой трубке 7 газ. Для этого открывают вентиль на баллоне и при помощи редукционных регуляторов давления 8 регулируют плавную подачу газа к образцу. Величину и перепад давления подбирают в зависи-

мости от проницаемости породы. Чем больше проницаемость, тем меньше должно быть подаваемое на образец давление. Расход газа, проходящего через образец, измеряют при помощи реометра 1, присоединенного к штуцеру 2 нижней крышки кернодержателя 3. Продолжительность испытания выбирается в зависимости от проницаемости породы. При хорошей и средней проницаемости достаточно выдержка в течение 2—5 мин, после того как установится режим течения газа.

4. В процессе испытания породы на проницаемость измеряют: а) давление $p_1 - p_2$ (мм рт. ст.) по разности уровня жидкости в ртутном манометре; перевод давления в миллиметрах ртутного столба в физические атмосферы производится по формуле

$$(p_1 - p_2)_{\text{атм}} = (p_1 - p_2)_{\text{мм рт. ст.}} / 760;$$

б) расход газа Q (см³) через образец — по величине разностей уровней воды в реометре Δh_p и по специальной градуировочной кривой $Q = f(\Delta h_p)$ за время t , с; в) температуру газа (температуру окружающего воздуха) и по ней в соответствующих таблицах справочников находят его вязкость η для данной температуры; г) атмосферное давление p_6 по барометру (мм рт. ст.), которое пересчитывают в физические атмосферы:

$$p_6_{\text{атм}} = p_6_{\text{мм рт. ст.}} / 760.$$

5. Произведя все перечисленные измерения при трех различных перепадах давления (например, 100, 150, 200 мм рт. ст.), вычисляют значения коэффициента проницаемости по формуле

$$K_{\pi} = Q\eta l \cdot 1000 / [Ft(p_1 - p_2)],$$

где K_{π} — коэффициент проницаемости, мД (10^{-3} мкм²).

Контрольные вопросы

1. Назовите основные показатели водных свойств горных пород.
2. Какие свойства горных пород называются водными и почему?
3. Показатели водоустойчивости глинистых пород.
4. Как оценивается водоустойчивость скальных и полускальных горных пород?
5. С чем связана способность глинистых пород набухать? Показатели, характеризующие это явление.
6. Опишите устройство приборов для исследования набухаемости глинистых пород.
7. Опишите методику определения усадки горных пород.
8. Чем отличаются породы влагоемкие от водоемких?
9. Методы определения полной и максимальной молекулярной влагоемкости.
10. Чему равна водоотдача горных пород и методы ее определения?
11. Дайте описание капилляриметра и методики работы с ним.
12. Показатели водопроницаемости горных пород.

13. Методы определения коэффициента фильтрации горных пород, общие их достоинства и недостатки.

14. Подразделение лабораторных методов исследования водопроницаемости горных пород.

15. Устройство прибора Г. Н. Каменского для определения коэффициента фильтрации горных пород.

16. Что нужно сделать, чтобы в приборе Г. Н. Каменского коэффициент фильтрации определить при градиенте, равном 0,5?

17. Отличительные особенности конструкции прибора Д. Капецкого.

18. В каких приборах обычно определяют коэффициент фильтрации глинистых пород?

19. Устройство компрессионно-фильтрационного прибора.

20. Порядок определения коэффициента фильтрации в приборе ПВ при нисходящем потоке воды.

21. Можно ли определить коэффициент фильтрации в трубке СПЕЦГЕО при градиенте, равном 7?

22. Устройство трубки Г. Н. Каменского и порядок работы с ней.

23. Дайте вывод формулы для определения коэффициента фильтрации глинистой породы по времени, необходимому для уплотнения ее заданной нагрузкой.

24. Каково достоинство прибора Ю. М. Абелева — А. Н. Озерецковского?

25. Порядок определения коэффициента проницаемости горных пород.

26. Назовите примерные значения коэффициента фильтрации различных горных пород.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Механическими свойствами горных пород называются такие, которые определяют их поведение под воздействием внешних усилий — нагрузки — и проявляются в сопротивлении разрушению и деформации. Свойство горных пород сопротивляться разрушению и образованию больших остаточных деформаций под действием нагрузки или, точнее, воспринимать не разрушаясь в определенных пределах и условиях те или иные нагрузки называется прочностью, а их свойство изменять под нагрузкой форму сложения и объем — деформацией. Эти свойства выражают и оценивают прочностными и деформационными показателями.

Природа прочности горных пород отличается значительной сложностью. В зависимости от влияния тех или других факторов их прочность может изменяться в широких пределах: они могут быть очень прочными, прочными, средней прочности, малой прочности и очень малой — предельно малой прочности. Кроме того, прочность одних горных пород проявляется в полной мере и сразу, у других она изменяется во времени. В соответствии с этим можно говорить об условно-мгновенной, или стандартной, и длительной прочности.

От различной прочности горных пород зависит и их деформируемость. Деформации, при прочих равных условиях, могут изменяться по абсолютной и относительной величине, характеру, т. е. быть обратимыми и необратимыми, развиваться быстро (мгновенно) или медленно во времени. Поэтому у одних горных пород наблюдается определенная однозначность зависимости деформаций от нагрузки, у других такой характерной однозначности не наблюдается, так как величина деформаций у них зависит как от величины напряжений, так и от скорости их приложения и длительности действия.

При оценке механических свойств горных пород необходимо исследовать определенные зависимости, характеризующие закономерности изменений их деформаций и прочности. Такие зависимости сведены в табл. V-1. Из этой таблицы видно, что параметры уравнений, характеризующих закономерности изменений деформаций и прочности горных пород, являются количественными показателями их механических свойств.

Для скальных пород характерны упругие свойства, а полускальные являются только частично упругими. В рыхлых обло-

Т а б л и ц а V-1. Основные зависимости, характеризующие закономерности изменений деформаций и прочности горных пород

Зависимости	Уравнения, отражающие зависимости	Параметры, являющиеся количественными показателями механических свойств горных пород
Относительных упругих деформаций от действующих напряжений	$\sigma = E \epsilon_x$	E — модуль упругости
Между поперечными и продольными относительными деформациями	$\epsilon_y = \mu \epsilon_x$	μ — коэффициент поперечной деформации
Бокового давления от вызвавшей его вертикальной нагрузки	$p_0 = \xi p$	ξ — коэффициент бокового давления
Относительных общих деформаций от действующих напряжений	$\sigma = E_0 \epsilon_x$	E_0 — модуль общей деформации
Изменения пористости от действующих напряжений	$de = a d\sigma$	a — коэффициент сжимаемости
Относительной сжимаемости от действующих напряжений	$a_0 = \frac{\Delta h}{h} = \frac{a\sigma}{1 + e}$	a_0 — коэффициент относительной сжимаемости
Сопrotivления разрушению при сжатии от действующей нагрузки	$p = R_{сж} F$	$R_{сж}$ — временное сопротивление сжатию
Сопrotivления разрушению при растяжении от действующей нагрузки	$p = R_p F$	R_p — временное сопротивление растяжению
Сопrotivления разрушению при скалывании от действующей нагрузки	$p = R_{ск} F$	$R_{ск}$ — временное сопротивление скалыванию
Сопrotivления сдвигу от действующего нормального напряжения		
а) для песков	$\tau = \operatorname{tg} \varphi \sigma_n = f \sigma_n$	$f = \operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент внутреннего трения φ — угол внутреннего трения
б) для глинистых пород	$\tau = c + f \sigma_n$	c — общее сцепление
Между сдвигающими и нормальными уплотняющими напряжениями	$\tau = F_{0н} \sigma_n = \operatorname{tg} \psi \sigma_n$	$F_{0н}$ — коэффициент сдвига ψ — угол сдвига
Между главными напряжениями в момент предельного равновесия		
а) для песков	$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$	
б) для глинистых пород	$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \operatorname{ctg} \varphi}$	

мочных несвязных и глинистых мягких связных породах чисто упругие свойства имеют подчиненное значение. Для оценки упругих свойств служат показатели, характеризующие способность горных пород упруго сопротивляться деформациям. Для изучения полускальных пород кроме показателей упругих свойств большое значение имеют показатели, характеризующие их способность сопротивляться общим деформациям, т. е. обратимым и необратимым. Для обломочных и глинистых пород главное значение имеют только показатели их общих деформаций.

Основными показателями деформационных свойств горных пород являются: модуль упругости, коэффициент поперечной деформации, коэффициент бокового давления, модуль общей деформации, коэффициент сжимаемости и коэффициент относительной сжимаемости (см. табл. V-1). Основные показатели просадочных пород, характеризующие их просадочность, — коэффициент макропористости e_m и коэффициент относительной просадочности a_m .

Различные группы горных пород имеют неодинаковый характер разрушения. Поэтому для оценки их прочности применяют и неодинаковые показатели прочности. Для скальных, полускальных и связных глинистых пород основными показателями прочности являются временное сопротивление сжатию, скалыванию и растяжению, а для мягких связных и рыхлых несвязных пород — показатели сопротивления сдвигу: угол внутреннего трения, коэффициент внутреннего трения, общее сцепление и в некоторых случаях коэффициент сдвига [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.].

Определение показателей деформируемости и прочности горных пород в лабораторных условиях производят на специальных приборах и установках различными методами, описание которых приводится ниже.

§ 2. МОДУЛЬ УПРУГОСТИ, МОДУЛЬ ОБЩЕЙ ДЕФОРМАЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СКАЛЬНЫХ, ПОЛУСКАЛЬНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ МЕТОДА ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

Как известно, модулем упругости является коэффициент пропорциональности между напряжением и соответствующей ему относительной деформацией:

$$\sigma = E\varepsilon_x.$$

Численно модуль упругости равен напряжению (килограмм-сила на квадратный сантиметр или паскаль), которое обусловило относительную деформацию, равную единице; его вели-

чина характеризует жесткость горных пород, т. е. способность упруго сопротивляться линейным деформациям.

Модуль общей деформации — характеристика, аналогичная модулю упругости; он выражает пропорциональность между общими деформациями (обратимыми и необратимыми) и вызывающими их напряжениями:

$$\sigma = E_0 \varepsilon_x.$$

Модуль общей деформации имеет размерность напряжений.

Важной характеристикой деформационных свойств горных пород является коэффициент поперечной деформации, выражающий отношение относительных поперечных деформаций к относительным продольным деформациям:

$$\mu = \varepsilon_y / \varepsilon_z,$$

откуда $\varepsilon_y = \mu \varepsilon_z$. Следовательно, коэффициент поперечной деформации представляет собой коэффициент пропорциональности между относительными поперечными и относительными продольными деформациями. Этот коэффициент у скальных и полускальных пород изменяется в пределах от 0,10 до 0,40; для крупнообломочных пород он в среднем равен 0,27, для песков и супесей 0,30, для суглинков 0,35 и для глин 0,42. Чем больше значение этого коэффициента, тем большей податливостью обладает порода.

Определение модуля упругости, модуля общей деформации и коэффициента поперечной деформации рассматриваемым методом основано на измерении продольных и поперечных деформаций образца горной породы при его испытании на одноосное сжатие (рис. V-1). Для этого необходимо иметь следующее оборудование: 1) пресс рычажный или специальную испытательную машину; 2) приборы для измерения продольных и поперечных деформаций образцов горных пород при их сжатии; 3) оборудование для определения влажности и плотности горных пород (см. гл. III); 4) журнал (см. табл. V-2). Прессы рычажные применяют при испытаниях горных пород малой прочности — мягких связных глинистых и некоторых разностей полускальных, обладающих временным сопротивлением сжатия меньше 2,5 МПа. Один из таких прессов изображен на рис. V-2.

Образец породы устанавливают на специальном винтовом столике, смонтированном на металлической балке, вделанной в стену так же, как и пресс. Столик имеет кронштейны, на которых крепятся индикаторы часового типа для измерения продольных и поперечных деформаций образца при сжатии. Если отношение плеч рычажного пресса равно 1:10, удельная на-

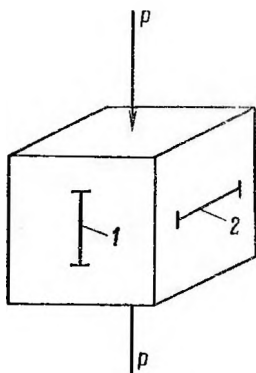
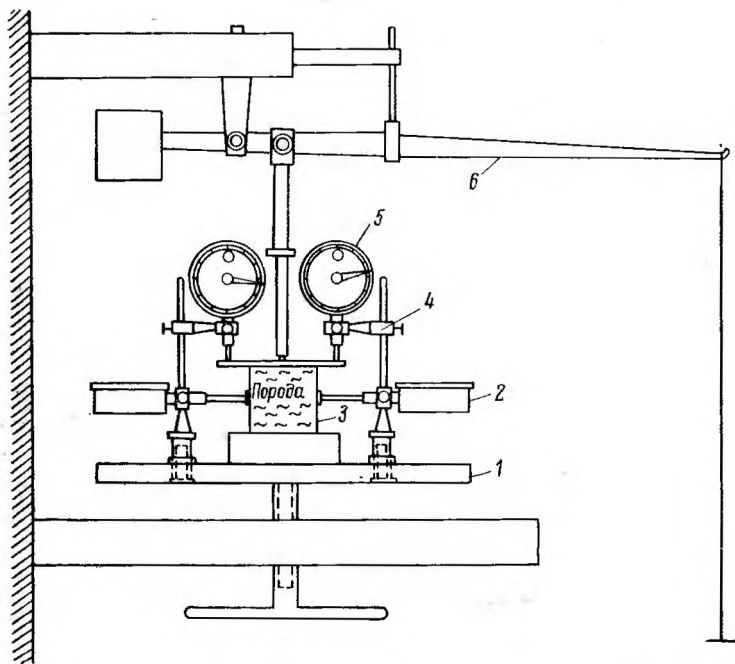


Рис. V-1. Схема ориентации образца горной породы при испытаниях на одноосное сжатие.

Тензометры для измерения деформаций:
1 — продольных, 2 — поперечных.

Рис. V-2. Рычажный пресс для испытания горных пород на сжатие.

1 — столик для установки образца или прибора; 2 — индикаторы для измерения поперечных деформаций; 3 — образец; 4 — кронштейны, на которых крепятся индикаторы; 5 — индикаторы для измерения продольных деформаций; 6 — рычажный пресс.



грузка, передаваемая прессом на образец, рассчитывается по формуле

$$R = 10P/F,$$

где R — удельная нагрузка на образец, кгс/см² (МПа); 10 — передаточное число системы рычага; P — общая нагрузка, при-

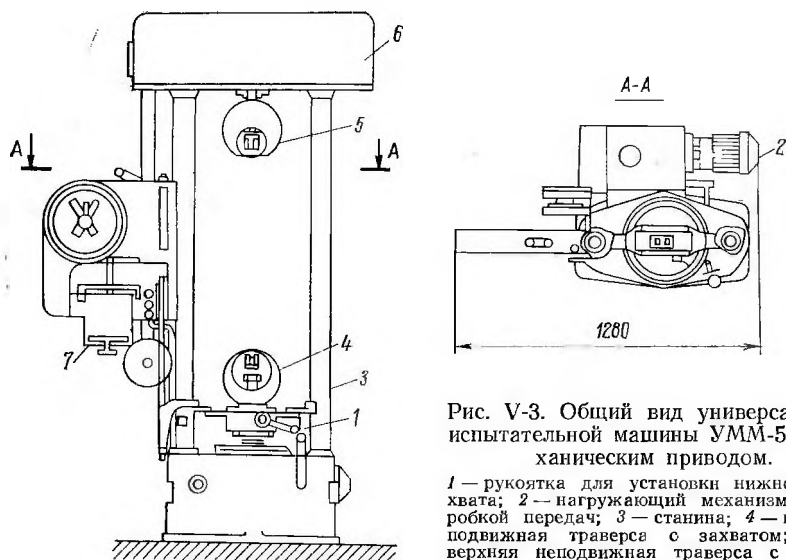


Рис. V-3. Общий вид универсальной испытательной машины УММ-5 с механическим приводом.

1 — рукоятка для установки нижнего захвата; 2 — нагружающий механизм с коробкой передач; 3 — станина; 4 — нижняя подвижная траверса с захватом; 5 — верхняя неподвижная траверса с захватом; 6 — силоизмерительный механизм (смонтирован в верхней коробке станины); 7 — измеритель деформаций с самопишущим диаграммным индикатором.

ложенная на подвеску рычага, кгс (Н); F — площадь образца, см^2 .

Испытательные машины, предназначенные для исследования образцов горных пород небольших размеров, применяются с механическим и гидравлическим механизмами нагружения. Наша промышленность в настоящее время выпускает несколько типов таких машин. На рис. V-3 изображена одна из моделей — универсальная испытательная машина УММ-5 с механическим приводом. Эта машина предназначена для статических испытаний материалов и горных пород на сжатие, растяжение и срез. Она состоит из следующих основных узлов: станины 3; нагружающего механизма с коробкой скоростей 2; силоизмерительного механизма 6; измерителя деформаций с самопишущим диаграммным аппаратом 7; верхней неподвижной траверсы с захватом 5 и нижней подвижной траверсы с захватом 4.

Станина представляет собой жесткую раму, образованную двумя чугунными коробками (верхней и нижней), соединенными двумя колоннами. Колонны одновременно являются направляющими, вдоль них перемещается подвижная траверса с захватом. Загрузочный механизм привода нижнего захвата (рис. V-4) состоит из электродвигателя 1, коробки скоростей 2, червячной передачи с шестерней 3, нагрузочного винта 4, на котором закреплена подвижная траверса с нижним захватом 6.

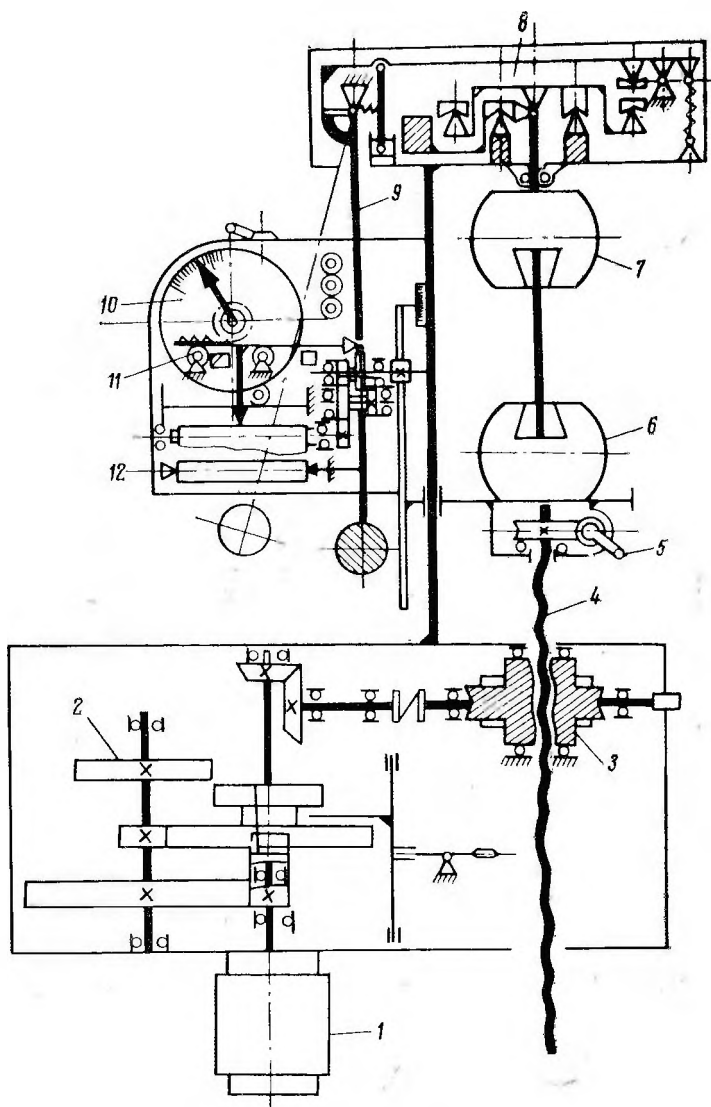


Рис. V-4. Схема работы универсальной испытательной машины УММ-5 с механическим приводом.

При вращении червячной шестерни нагрузочный винт получает поступательное движение вверх и вниз в зависимости от необходимости приложения сжимающей или растягивающей нагрузки. Реверсирование осуществляется переключением электродвигателя. Вращение от электродвигателя и червячной пере-

дачи передается через коробку скоростей, позволяющую установить пять скоростей деформирования: 2, 4, 10, 20 и 50 мм/мин. Скорость 100 мм/мин служит для ускоренного перемещения нижнего захвата без нагрузки. Для установочного движения нижнего захвата служит механизм ручного перемещения с рукояткой 5, который смонтирован внутри подвижной траверсы. Верхний захват 7 через промежуточную тягу подвешен к главному рычагу силоизмерительного механизма 8.

От главного рычага через промежуточные звенья силоизмерительного механизма усилие передается на рычаг маятника 9, вызывая его отклонение, пропорциональное приложенной нагрузке. Груз на конце маятника позволяет получить четыре диапазона нагрузок (кгс): 0—500; 0—1000; 0—2500 и 0—5000 ($1 \text{ кгс} \approx 9,8 \text{ Н}$). Выбор рабочего диапазона зависит от размера образца горной породы и предполагаемой ее прочности. При отклонении маятника перемещается рейка 11, поворачивающая шестерню со стрелкой 10 вдоль шкалы силоизмерительного механизма. Показания стрелки фиксируются контрольной стрелкой на одной из четырех шкал в соответствии с выбранным диапазоном нагрузки.

В силоизмерителе установлен диаграммный аппарат барабанного типа 12, который может вычерчивать диаграмму «нагрузка — деформация» испытуемого образца. Погрешность записи по нагрузкам $\pm 1,5 \text{ мм}$, по деформациям $\pm 5 \%$ от действительной деформации, выраженной в соответствующем мас-

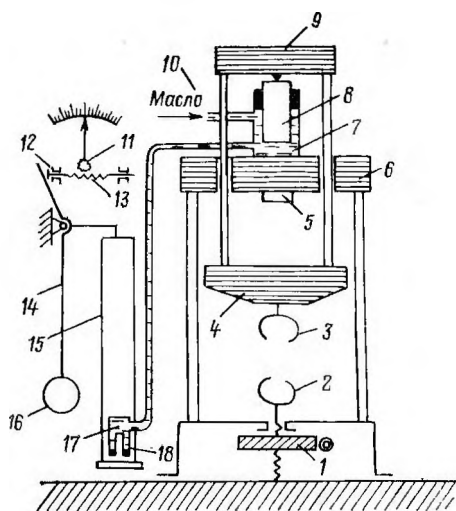


Рис. V-5. Схема работы универсальной испытательной машины с гидравлическим приводом.

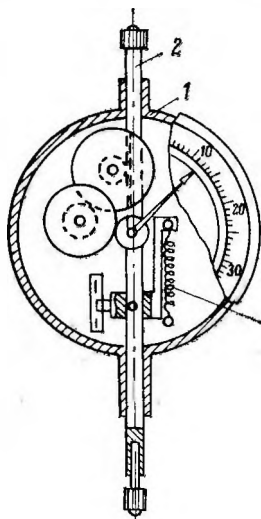


Рис. V-6. Индикаторный тензомер часового типа.

штабе. Запись деформаций производится в двух масштабах — 1:1 и 5:1. Каждая машина снабжена приспособлениями для испытания образцов горных пород на сжатие, разрыв и скалывание.

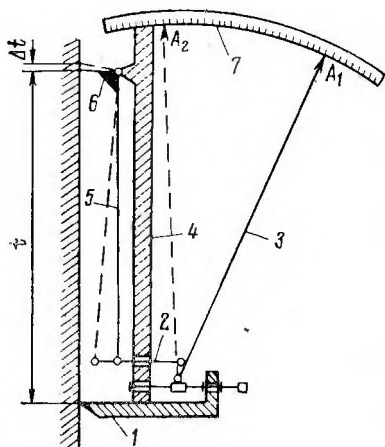
Машин для статических испытаний с гидравлическим приводом существует несколько типов. На рис. V-5 показана принципиальная схема работы таких машин. Они, как правило, состоят из трех узлов: нагрузочного устройства 6, силоизмерительного механизма 12 и насоса (на схеме не показан). Масляный насос подает масло из бака по маслопроводу 10 в рабочий цилиндр 7 нагрузочного устройства 6. Под давлением масла в рабочем цилиндре поднимается поршень 8, который толкает вверх траверсу 9. При установке образца в захватах 3 и 2 создается растяжение, а при установке между траверсой 4 и неподвижной подушкой 5 — сжатие.

Масло, поступающее в силоизмерительный цилиндр 17, вызывает перемещение поршня 18 и через рамку 15 — маятника 14 с грузом 16. Отклонение маятника (пропорциональное давлению масла в рабочем цилиндре 7 и усилию, развиваемому машиной) передается рейке 13 и заставляет поворачиваться шестеренку 11 со стрелкой. Рейка связана с самописцем, вычерчивающим на барабане (на схеме не показан) график усилий. Поворот барабана пропорционален перемещению траверсы 9, связанной шнурком с барабаном, а значит, пропорционален деформации образца. Маятник 14 имеет сменные грузы, что позволяет получить несколько диапазонов нагрузок. При необходимости расстояние между захватами 3 и 2 регулируют, включая электродвигатель червячной передачи 1, или вручную.

Измерение продольных и поперечных деформаций образцов горных пород при сжатии для вычисления характеристик их деформируемости производят с помощью тензометрических устройств. Последние также служат для контроля однородности напряженного состояния образцов пород при нагружении путем измерения их деформаций в разных местах. В лабораторной практике наиболее часто пользуются следующими видами тензометрических устройств: 1) индикаторными тензомерами часового типа; 2) рычажными тензомерами; 3) электротензомерами с проволочными датчиками сопротивления.

Индикаторный тензомер часового типа предназначен для измерения линейных деформаций с погрешностью до 0,005 мм. Схема такого индикатора показана на рис. V-6. Корпус индикатора 1 устанавливают на специальном кронштейне, и в процессе измерений он остается неподвижным. Измерительный стержень 2 пружиной постоянно прижимается к поверхности образца или детали прибора, перемещение (деформацию) которых измеряют. Перемещение измерительного стержня через систему шестерен передается малой и большой стрелкам на

Рис. V-7. Рычажный тензометр.



циферблате индикатора. Малая стрелка отмечает целые миллиметры по малой шкале, где цена деления равна 1 мм, большая стрелка — доли миллиметра на большой шкале, где цена деления равна 0,01 мм. При перемещении измерительного стержня на 1 мм большая стрелка описывает полный круг вдоль большой шкалы, которая разбита на 100 делений. Для установки большой стрелки на нуль большая шкала сделана поворачивающейся.

Рычажный тензометр, так же как и индикатор, представляет собой прибор для измерения линейных деформаций; на рис. V-7 показана схема одного из таких приборов. Основой прибора является рамка 4, которая имеет неподвижную 1 и подвижную 6 призмы. При измерении деформаций призмы плотно прижимаются к образцу породы. Подвижная призма соединена с рычагом 5, который через тягу 2 соединен со стрелкой 3. Стрелка передвигается вдоль зеркальной шкалы 7, на которой нанесены миллиметровые деления. Деформации образца горной породы измеряются между призмами 1 и 6. Это расстояние, называемое базой прибора, равно 10—20 мм, а у некоторых типов тензометров 100—150 мм.

При изменении длины образца на величину Δl призма 6 поворачивается и через рычаг 5 и тягу 2 вызывает отклонение стрелки 3 на величину $\Delta A = A_1 - A_2$. Благодаря большому соотношению плеч рычагов прибора перемещение стрелки по шкале на одно деление соответствует перемещению подвижной призмы на 0,01 или 0,05 мм. Коэффициент увеличения K приведен в паспорте прибора, он равен

$$K = \Delta A / \Delta l.$$

Для получения должной точности измерения деформаций тензометры устанавливают с двух противоположных сторон образца.

Электротензометры с проволочными датчиками сопротивления являются устройствами для измерения малых линейных деформаций. В настоящее время электротензометрия широко применяется в практике лабораторных измерений деформаций скальных и полускальных горных пород малой влажности, так

Рис. V-8. Проволочный датчик сопротивления.

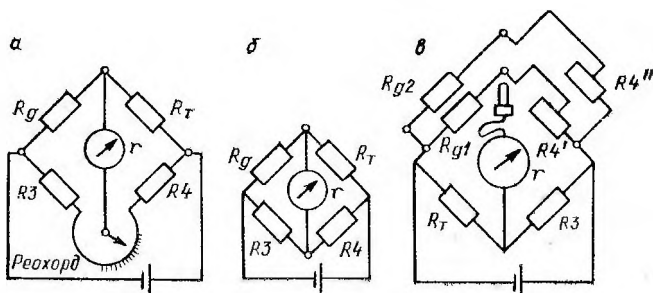
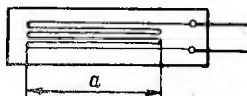


Рис. V-9. Схема включения датчиков сопротивления при электротензометрическом методе измерения деформаций.

а — схема уравновешенного моста; б — схема неуравновешенного моста; в — схема включения датчиков для одновременного измерения деформаций в разных точках.

как позволяет производить измерения с большой точностью и, кроме того, измерять как продольные, так и поперечные деформации в одной и той же точке образца.

Электротензометрический метод измерения деформаций основан на законе прямой пропорциональной зависимости изменения омического сопротивления проводника от изменения его длины. Проволочный датчик сопротивления представляет собой проводник в виде нескольких петель проволоки из материала с высоким удельным сопротивлением (константан, нихром или манганин), диаметром 0,02—0,05 мм, заклеенной между двумя слоями тонкой бумаги или пленки.

Для измерения деформаций чаще всего применяют датчики с базой $a = 20 \div 25$ мм (рис. V-8), реже — с меньшей. Их наклеивают клеем БФ-2 или эпоксидной смолой на поверхность образца так, чтобы база датчика совпадала с направлением измеряемой линейной деформации. Датчик, прочно приклеенный к образцу, точно отражает его деформации, т. е. так же, как образец, сжимается и растягивается.

При деформациях сжатия омическое сопротивление датчика уменьшается, а при деформациях растяжения — увеличивается согласно уравнению

$$\Delta R_d = K \epsilon R_d^0$$

где ΔR_d — приращение омического сопротивления датчика вследствие его деформации; K — коэффициент чувствительности датчика (постоянная величина, зависящая от материала

проводника датчика); ϵ — линейная деформация образца в месте наклейки датчика на участке, равном его базе; R_d — начальное омическое сопротивление датчика.

Наклеивать датчики можно только на породы, достаточно плотные и прочные, малой влажности, т. е. практически условно сухие. Поэтому электротензометрический метод успешно может применяться только для скальных и некоторых полускальных пород. Чтобы измерить изменения омического сопротивления датчика при деформациях, применяют соответствующие электроизмерительные приборы, которые включают по той или иной схеме в цепь мостика Уинстона. Наиболее часто используются две схемы: схема уравновешенного моста (нулевой метод) и схема неуравновешенного моста (метод непосредственного отсчета).

Первая схема показана на рис. V-9, а. В эту схему входят резисторы с сопротивлениями: R_d — рабочего датчика, R_t — датчика температурной компенсации, R_3 и R_4 — регулировочные. Между резисторами R_3 и R_4 включен чувствительный реохорд (переменный резистор) для тонкой регулировки сопротивления. Кроме того, в цепь включен гальванометр.

Датчик температурной компенсации, подобный рабочему, наклеивают на такой же образец породы, какой будет подвергаться испытаниям, и располагают вблизи от него, т. е. в тех же температурных условиях. Этим обеспечивается равенство температурных условий для резисторов R_t и R_d . Уравновешенное состояние мостика имеет место в том случае, если ток в ветви гальванометра равен нулю, т. е. тогда, когда

$$R_d R_4 = R_t R_3.$$

Поэтому в начале испытаний мостик балансируют и замечают положение движка на шкале реохорда. При деформации образца горной породы сопротивление рабочего датчика R_d изменяется на величину ΔR_d . При этом уравновешивание мостика нарушается и в ветви гальванометра появляется ток, сила которого увеличивается с увеличением ΔR_d . При изменении сопротивления рабочего датчика R_d мостик снова балансируют, т. е. стрелка гальванометра возвращается в первоначальное положение, и отсчет производят по положению движка реохорда. Таким образом, изменение сопротивления измеряется по шкале реохорда. Зная начальное сопротивление датчика R_d , коэффициент его чувствительности K и приращение омического сопротивления ΔR_d , вычисляют величину линейной деформации образца.

Схема неуравновешенного моста показана на рис. V-9, б. В этом случае, так же как и в предыдущем, изменение сопротивления измеряется мостиком Уинстона, в одно плечо которого включается рабочий датчик сопротивления R_d . При изменении

сопротивления рабочего датчика вследствие деформации образца горной породы под нагрузкой баланс мостика нарушается и стрелка гальванометра отклоняется на n делений. Зная цену деления шкалы гальванометра, определяют деформацию образца по направлению базы датчика

$$\varepsilon = \varepsilon_0 n.$$

Для определения цены деления гальванометра определяют разность его показаний n_0 при включении определенного дополнительного сопротивления ΔR_0 . Тогда относительная деформация, соответствующая одному делению гальванометра, будет равна

$$\varepsilon_0 = \Delta R_d / (R_d K n_0).$$

При необходимости одновременно измерить деформации в разных точках образца применяют специальную схему (тензометрические станции типа ИД-61м и ИД-62м), позволяющую поочередно включать в цепь мостика Уинстона несколько рабочих датчиков (рис. V-9, в). При этом балансировка мостика производится для каждого рабочего датчика.

Последовательность определения

1. Для определения модуля упругости, модуля общей деформации и коэффициента поперечной деформации скальных и некоторых типов полускальных пород (повышенной плотности и прочности) методом одноосного сжатия изготавливают образцы цилиндрической формы диаметром 40—45 мм и высотой 10—12 см. Отношение высоты к диаметру должно быть не менее 2. При нагружении образцов таких размеров в средней их части создаются равномерные напряжения. Для указанных пород применимы также образцы призматической формы сечением 40×40, 45×45 мм и высотой 10—12 см, хотя исследование деформационных свойств горных пород на образцах такой формы не будет полностью соответствовать стандартной методике.

При исследованиях глин и полускальных пород пониженной плотности и прочности могут применяться столбики керна диаметром и высотой 40—45 мм или кубики сечением 5×5×5 см. Торцы образцов должны быть строго параллельны и пришлифованы по лекальной линейке. При изготовлении образцов необходимо обращать особое внимание на точность пришлифовки рабочих поверхностей и на их параллельность, так как это влияет на равномерность распределения напряжений.

2. Для каждой серии образцов, по которым исследуются деформационные свойства горных пород, составляют полную характеристику их петрографических особенностей и физического

состояния, т. е. плотности, пористости, влажности и др. (см. гл. I, рис. I-1).

3. Измеряют сечение и высоту образцов штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Если прочность горных пород на одноосное сжатие $R_{сж}$ неизвестна, ее оценивают ориентировочно, так как исследование деформационных свойств производят при нагрузках не выше $0,6 R_{сж}$, т. е., как правило, в пределах линейной фазы развития деформаций.

4. В зависимости от применяемого способа измерения деформаций подготавливают соответствующие тензометры. Тензометры часового типа устанавливают на кронштейнах (см. рис. V-2), рычажные крепят с помощью специальных трубинок, а электротензометрические датчики наклеивают на боковые поверхности образца (см. рис. V-1). Для контроля равномерности приложений нагрузки и однородности напряженного состояния образца, для измерения каждого вида деформаций (продольных и поперечных) применяют не менее двух тензометров, располагая их на противоположных поверхностях. Наличие двух тензометров позволяет определять среднее значение деформаций.

5. Образец помещают под пресс. Нагрузочную плиту или штамп пресси подводят к образцу. Устанавливают в надлежащее положение тензометры для измерения продольных и поперечных деформаций и производят тщательную центровку образцов на прессе. Для проверки правильности центрирования образца его плавно нагружают до величины, равной $(0,05 \div 0,1) R_{сж}$, и по всем тензометрам определяют величину деформации. Для каждой пары одноименных тензометров расхождение значений деформации допускается в пределах 15—20 %. Бóльшее расхождение указывает на недопустимую неоднородность напряженного состояния образца вследствие несоосности прилагаемых усилий, т. е. неправильной его центровки. Для исправления положения снимают нагрузку и образец слегка смещают относительно нагрузочных устройств так, чтобы добиться соосности действующих усилий. После этого вновь прикладывают нагрузку и производят повторную проверку центровки. На этом заканчивается подготовка к исследованиям.

6. Исследование деформационных свойств сводится к нагружению подготовленного образца горной породы и измерению продольных и поперечных деформаций. Максимальная нагрузка на образец, как отмечено выше, не должна превышать 0,6 предела прочности породы на одноосное сжатие $R_{сж}$. В зависимости от целей исследования нагрузку на образец можно давать возрастающими ступенями до максимальной величины $(0,6 R_{сж})$ с последующей разгрузкой, т. е. при одном цикле испытаний, или возрастающими ступенями до максимальной величины с промежуточными разгрузками, т. е. при двух-трех

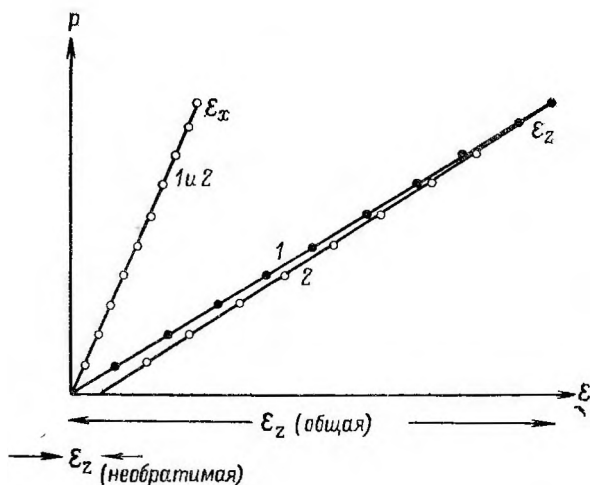


Рис. V-10. Диаграмма результатов испытаний горных пород на одноосное сжатие по методу одного цикла.

1 — ветвь нагрузки; 2 — ветвь разгрузки.

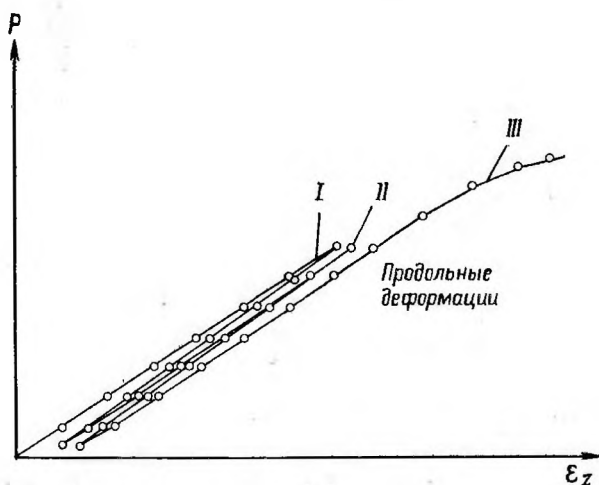


Рис. V-11. Диаграмма результатов испытаний горных пород на одноосное сжатие по методу трех циклов.

I и II — циклы нагрузки и разгрузки; III — цикл нагрузки.

циклах испытаний. В первом случае можно построить диаграмму (рис. V-10), по которой получить данные для вычисления E , E_0 и μ . Во втором случае (рис. V-11) такая диаграмма кроме данных для вычисления деформационных показателей

дает более полную характеристику развития деформаций от нагрузки. При разгрузках не следует производить полное снятие груза, чтобы не произошло случайного смещения образца и нарушения его центровки.

7. Величина ступеней нагрузки зависит от прочности породы; как правило, она не должна превышать $0,1 R_{сж}$. Каждая ступень нагрузки задается после стабилизации деформаций от предыдущей ступени. При режиме испытаний с промежуточными разгрузками, обычно после двух- или трехкратной нагрузки и разгрузки образца, последнее нагружение доводят до разрушающей величины.

8. По полученным данным модуль упругости E и модуль общей деформации E_0 вычисляют следующим образом:

$$E = \sigma / \epsilon_{z \text{ обр}} = P \Delta h / (F_0 h);$$

$$E_0 = \sigma / \epsilon_{z \text{ общ}} = P \Delta h / (F_0 h),$$

где P — нагрузка, Н; F_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца, см^2 ; Δh — величина абсолютной упругой (при вычислении модуля упругости) или абсолютной общей (при вычислении модуля общей деформации) деформации, см; h — высота образца или длина части образца, в пределах которой производится измерение деформации (база тензометра), см; ϵ_z — относительная продольная деформация (обратимая или общая).

При вычислении модуля упругости величину абсолютной деформации Δh следует определять по ветви разгрузки, так как в этом случае проявляются лишь упругие деформации. В скальных и некоторых типах полускальных пород ветви нагрузки и разгрузки сливаются. В других горных породах благодаря развитию необратимых (пластических) деформаций ветви нагрузки и разгрузки не сливаются и общая деформация $\epsilon_{\text{общ}} = \epsilon_{\text{обр}} + \epsilon_{\text{необр}}$. Поэтому при вычислении модуля общей деформации величину абсолютной общей деформации следует определять по ветви нагрузки.

Коэффициент поперечной деформации принято вычислять по общим относительным деформациям:

$$\mu = \epsilon_y / \epsilon_z.$$

9. Для каждой пробы породы исследования производят не менее чем на трех образцах. Расхождения значений показателей деформационных свойств пород между параллельными определениями не должны превышать 5 %.

Все данные, полученные в процессе выполнения исследований, записывают в журнал (табл. V-2) и в сводную ведомость (приложение 3).

§ 3. УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКАЛЬНЫХ И ПОЛУСКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Для определения упругих характеристик скальных и полускальных горных пород широко используются динамические методы. Они основаны на существующей линейной связи между скоростями распространения упругих волн в горных породах и их упругими характеристиками. Поэтому, если в исследуемом образце породы возбудить волновые колебания ультразвуковой частоты (более 20 000 периодов в секунду, т. е. более 20 000 Гц) и измерить скорость их распространения, можно вычислить упругие характеристики породы.

В твердых и полутвердых породах, какими и являются породы скальные и полускальные, при звуковых импульсах возникают три типа упругих волн: продольные P , поперечные S и поверхностные R . Скорости распространения продольных v_P и поперечных v_S волн являются основными характеристиками динамических свойств горных пород.

Скорость распространения упругих волн (м/с) в безграничной среде (т. е. когда отношение поперечного сечения образца к длине волны $r/\lambda > 1$) связана с упругими характеристиками среды следующими зависимостями:

$$v_P = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}}; \\ v_S = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}},$$

где E_d — модуль упругости динамический, кгс/см² (МПа); μ — коэффициент поперечной деформации; ρ — плотность горных пород (г/см³), равная γ/g ; γ — удельный вес горных пород, гс/см³ (Н/см³); g — ускорение свободного падения.

Величина отношения скорости продольных волн к скорости поперечных волн зависит только от коэффициента поперечной деформации пород и поэтому может служить его характеристикой:

$$v_P/v_S = \sqrt{2(1-\mu)/(1-2\mu)}.$$

Из приведенного следует, что скорость распространения продольных и поперечных волн в твердых и полутвердых горных породах определяется их упругими характеристиками и плотностью. Откуда следует

$$E_d = v_P^2 \rho [(1+\mu)(1-2\mu)/(1-\mu)]; \\ \mu = (v_P^2 - v_S^2) / [2(v_P^2 + v_S^2)],$$

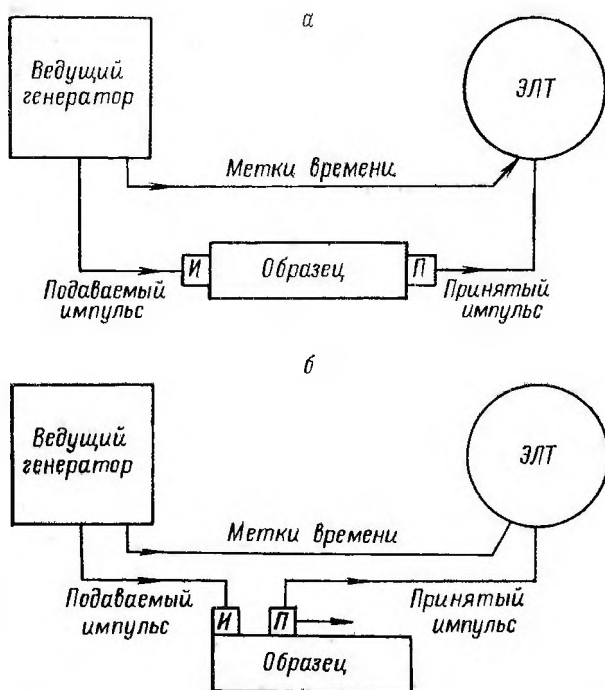


Рис. V-12. Схема импульсных ультразвуковых методов исследования распространения упругих волн в образцах горных пород.

а — метод прозвучивания; *б* — метод продольного профилирования.
И — излучатель; П — приемник; ЭЛТ — электронно-лучевая трубка.

Скорость распространения продольных волн в тонком стержне (когда $r/\lambda < 0,5$) и соответственно динамический модуль упругости определяются следующими зависимостями:

$$v_p = \sqrt{E_d/\rho}; \quad E_d = v_p^2 \rho.$$

В лабораторных условиях для определения скорости распространения упругих волн в образцах горных пород наиболее часто применяют импульсные ультразвуковые методы: прозвучивания и продольного профилирования.

При прямом прозвучивании датчики ультразвука — излучатель и приемник звуковых импульсов — располагают на противоположных концах образца (рис. V-12, *а*), при этом скорость прохождения продольных волн определяется по формуле

$$v_p = l/(t - \Delta t),$$

где l — расстояние между датчиками ультразвука (от излучающего до принимающего звуковые импульсы), м; t — время

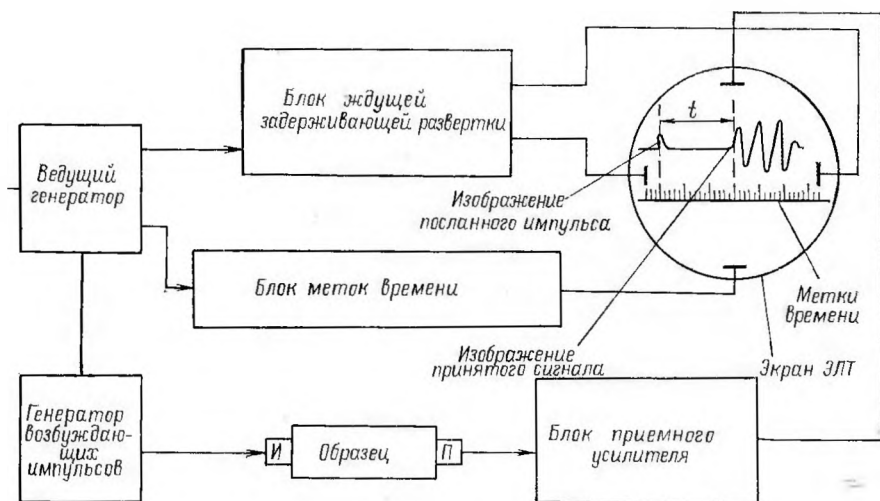


Рис. V-13. Принципиальная схема импульсного ультразвукового прибора (ИПА) для исследования распространения упругих волн в образцах горных пород.

t — время распространения ультразвука.

прохождения импульса по образцу, c ; Δt — поправка за запаздывание импульса в электрической системе прибора.

Метод прозвучивания наиболее надежно позволяет определять скорость распространения продольных волн. Если определять скорость распространения таких волн в образце в трех взаимно перпендикулярных направлениях, можно получить данные об анизотропии свойств породы.

При применении метода продольного профилирования один из датчиков — излучатель — устанавливают неподвижно на одном конце профиля, а другой — приемник — постепенно, последовательно перемещают вдоль профиля (вдоль боковой поверхности образца) на расстояние 1—2 см (рис. V-12, б). Длина профиля равна длине образца и обычно изменяется от 8—10 до 20—30 см. После каждого перемещения датчика — приемника на шаг профилирования (1—2 см) определяют время прохождения продольной P и поверхностной R волн.

Считается, что при определении упругих характеристик скальных и полускальных горных пород динамическими методами следует сочетать продольное профилирование с прозвучиванием каждого образца в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

Для выполнения таких исследований необходимо иметь:

1) электронный импульсный ультразвуковой прибор типа ИПА (импульсная переносная аппаратура), УИС (ультразву-

ковой импульсный способ) или УС-1 (ультразвуковой сейсмо-скоп);

2) оборудование для изучения петрографических особенностей и физического состояния пород;

3) журнал для записи наблюдений (см. табл. V-3).

Электронные импульсные ультразвуковые приборы предназначены для определения и исследования сейсмических характеристик различных типов горных пород в полевых и лабораторных условиях.

Принципиальная схема наиболее распространенного прибора такого типа (ИПА) показана на рис. V-13. Генератор возбуждающих импульсов подает на пьезоэлектрический излучатель импульсы высокого напряжения с частотой повторения 25 Гц. Пьезоэлектрический излучатель преобразует электрические импульсы в импульсы ультразвуковых колебаний, скорость распространения которых зависит от свойств горной породы. Ультразвуковые колебания, прошедшие через образец, воспринимаются и преобразуются в электрические сигналы пьезоэлектрическими приемниками и подаются на осциллограф (экран электронно-лучевой трубки), который обеспечивает визуальное наблюдение исследуемых сигналов и измерение времени прохождения их через образец породы. С помощью специальной приставки наблюдаемые процессы могут быть сфотографированы.

Последовательность определения

1. Для исследования скорости распространения упругих волн в горных породах желательно отбирать образцы правильной геометрической формы в виде кусков керна, штаффов в форме призм или брусков диаметром 40—50 мм и длиной 150—200 мм. В отдельных случаях могут применяться образцы и неправильной формы. Как правило, они должны быть естественной влажности, без явно видимых нарушений сплошности — трещин и не содержать нехарактерных для породы включений.

Для прозвучивания противоположные торцы образца должны быть параллельными, с ровными поверхностями (шлифовать поверхности нет необходимости). Для продольного профилирования на одной стороне или грани образца подготавливается площадка также с ровной поверхностью длиной не менее 8—10 см. На этой площадке через каждые 10—20 мм ставят метки (шаг профилирования), обозначающие места установки датчика — приемника.

2. Подготовив образцы, приступают к подготовке аппаратуры в следующем порядке.

А. К штепсельному разъему на задней стенке осциллографа

подсоединить шнур питания. С помощью соединительного кабеля подключить к осциллографу генератор. К высокочастотным разъемам на панелях осциллографа и генератора подключить пьезоэлектрические датчики.

Б. Проверить наличие предохранителя. Включить шнур питания в сеть переменного тока, предварительно убедившись в том, что напряжение сети в лаборатории соответствует требующемуся для прибора. Тумблер «сеть» установить в положение «вкл.». При этом на передних панелях осциллографа и генератора должны зажечься лампочки.

В. Дать прогреться аппаратуре 5—7 мин. На экране электронно-лучевой трубки должны появиться два параллельных луча, показывающих на верхней строчке процесс распространения ультразвука, а на нижней — метки времени. С помощью ручек «яркость», «фокус», «ось X», «ось Y» установить нормальный режим электронно-лучевой трубки, при этом светящиеся на экране лучи должны фиксироваться на его середине и быть необходимой яркости.

Г. С помощью ручки «кратность» установить коэффициент деления основных меток времени 1:5. Кратные метки должны следовать после четырех основных. Вращая ручку «задержка» против часовой стрелки, установить минимальную задержку. С помощью ручки «совмещение» установить зондирующий импульс на верхнем луче в левой части экрана. Зондирующий импульс должен совмещаться с одной из кратных меток. Поднося датчики друг к другу, проверить появление волновой картины на верхнем луче электронно-лучевой трубки. На этом заканчивается подготовка аппаратуры.

3. В зависимости от применяемого метода (прозвучивание или профилирование) устанавливают соответствующим образом датчики (см. рис. V-12). Для создания лучшего контакта между образцом и датчиком поверхность образца смазывают солидолом, техническим вазелином или пластилином, при этом датчик притирают к поверхности образца.

4. Как отмечено выше, при изучении упругих характеристик горных пород следует сочетать прямое прозвучивание образцов с продольным профилированием. Причем прямое прозвучивание позволяет наиболее надежно определять только скорости распространения продольных волн v_P , а продольное профилирование — как скорости продольных волн v_P , так и скорости поверхностных v_R . Непосредственно определив скорости v_P и v_R , скорости распространения поперечных волн v_S рассчитывают или находят по номограммам, как указано ниже.

5. Для определения скорости распространения продольных волн в образце горной породы при прозвучивании измеряют:

а) расстояние l (м) между датчиками штангенциркулем (рис. V-14, а);

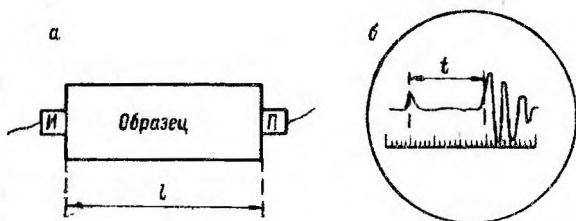


Рис. V-14. Измерение расстояния (а) и времени распространения продольных волн (б) при прозвучивании.

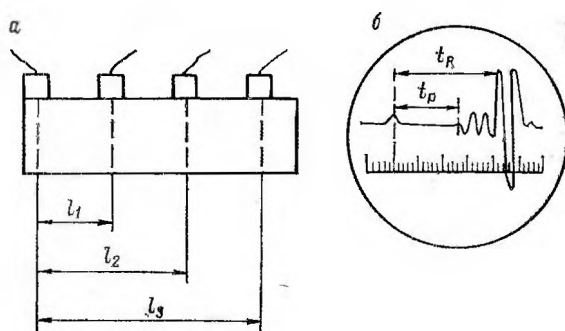


Рис. V-15. Измерение расстояния (а) и времени распространения волн (б) при продольном профилировании.

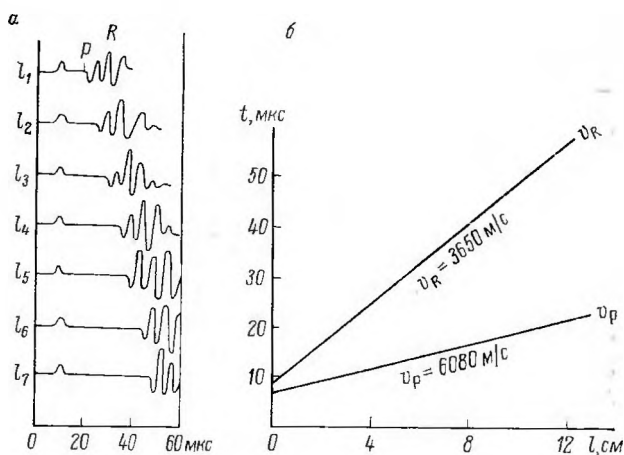


Рис. V-16. Осциллограммы продольного профилирования (а) и фазовые голографы (б).

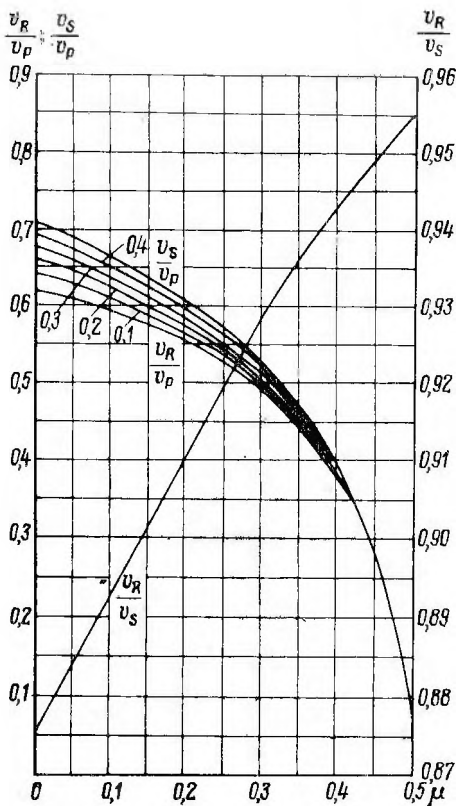


Рис. V-17. Номограмма для определения коэффициента поперечной деформации и скорости распространения поперечных волн.

б) время t (мкс) распространения упругих волн по экрану осциллографа как расстояние между передним краем посланного импульса — отметкой момента излучения и передним фронтом пришедшего сигнала — первым вступлением волны (рис. V-14, б);

в) поправку на запаздывание импульса Δt , для чего датчики устанавливают друг на друга рабочими поверхностями и по изображению на экране осциллографа определяют время запаздывания пришедшего импульса относительно отметки момента излучения; в литературе

имеются указания, что Δt обычно примерно равно 1 мкс.

После всех измерений скорость v_P (м/с) вычисляют по формуле

$$v_P = [l/(t + \Delta t)] \cdot 10^6.$$

6. Для определения скорости распространения волн в образце горной породы при продольном профилировании измеряют:

а) расстояние (м) между датчиками (рис. V-15, а);

б) время t прохождения продольной волны, как и при прозвучивании, и поверхностной волны по расстоянию между отметкой момента излучения и первым резким отклонением луча по верхней строчке ЭЛТ, показывающей процесс распространения ультразвука (рис. V-15, б).

При этом после каждого перемещения датчика — приемника на шаг профилирования (1—2 см) определяют время прохождения продольной P и поверхностной R волн (рис. V-16, а).

По сделанным измерениям строят соответствующие фазовые годографы, связывающие время распространения упругих волн

с расстоянием между датчиками (рис. V-16, б). После этого скорость распространения продольных волн вычисляют так же, как и при прозвучивании, а скорость поверхностных v_R (м/с) по следующей формуле:

$$v_R = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} = \frac{l_3 - l_2}{t_3 - t_2} = \dots = \frac{\Delta l}{\Delta t} \cdot 10^6.$$

7. По соотношению v_R/v_P по номограмме Кнюпова (рис. V-17) определяют значение μ . Затем по той же номограмме находят отношение v_R/v_S и, зная значение v_R , определяют скорость распространения поперечных волн v_S .

Динамический модуль упругости определяют по скорости распространения продольных или поперечных волн, коэффициенту поперечной деформации и плотности пород по вышеприведенным формулам или номограмме (рис. V-18).

8. Все данные, полученные в процессе опыта, записывают в журнал (табл. V-3), а окончательный результат — в сводную таблицу (приложение 3).

§ 4. КОЭФФИЦИЕНТ БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Метод расчета

При сжатии горных пород в условиях невозможности бокового их расширения развивается боковое давление p_b (распор). Отношение бокового

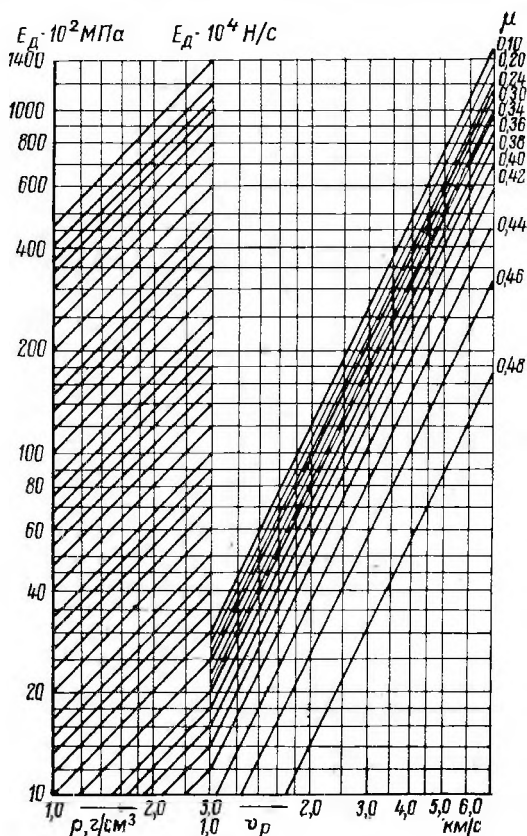


Рис. V-18. Номограмма для определения динамического модуля упругости горных пород E_d по скорости распространения продольных волн v_P , коэффициенту поперечной деформации пород μ и их плотности ρ (по А. И. Савичу и др.).

Таблица V-3. Журнал для определения упругих характеристик горных пород динамическими методами

Лабораторный номер	Номер опыта	Расстояние между датчиками l , м	Время распространения упругих волн t , мкс	Поправка на запаздывание импульса, мкс	Скорость распространения, м/с		Отношение $\frac{v_R}{v_P}$	Коэффициент поперечной деформации μ	Модуль упругости динамический E_d , МПа	Примечание
					продольной волны $v_P = \frac{l}{t - \Delta t} \cdot 10^6$	поверхностной волны $v_R = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} \cdot 10^6$				
										Диаметр образца, см; длина образца, см; ρ , г/см ³

давления к вызвавшему его вертикальному давлению p называется коэффициентом бокового давления. Эту безразмерную величину обычно определяют через коэффициент поперечной деформации или для песчаных и глинистых пород по углу их внутреннего трения по следующим формулам:

$$\xi = \mu / (1 - \mu);$$

$$\xi = \operatorname{tg}^2 (45^\circ - \varphi / 2).$$

Коэффициент бокового давления изменяется в пределах от 0—0,1 у скальных пород до 0,2—0,3 у полускальных. Для песков он равен 0,35—0,41, для суглинков и глин от 0,20—0,25 до 0,70—0,75. Из сказанного следует, что коэффициент бокового давления целесообразно определять для полускальных пород, рыхлых песчаных несвязных и мягких глинистых связных.

Метод трехосного сжатия

Коэффициент бокового давления полускальных, рыхлых несвязных и мягких связных пород можно определять в специальных приборах, моделирующих пространственное объемное напряжение—трехосное сжатие. Такие приборы называются стабилометрами. Схема работы их показана на рис. V-19,

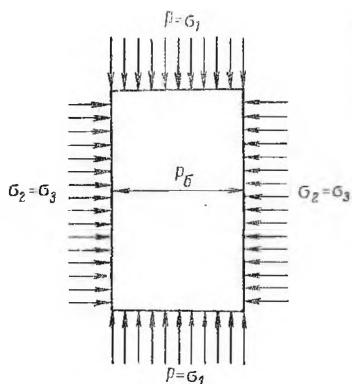
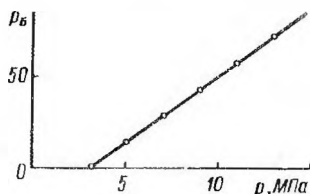


Рис. V-19. Схема работы приборов трехосного сжатия.

Рис. V-20. График зависимости изменения бокового давления горной породы от вертикальной нагрузки.



а описание приведено ниже, в § 11. На рис. V-19 видно, что осевая нагрузка на образец $P = \sigma_1$ в податливых породах будет вызывать появление бокового давления $p_6 = \sigma_2 = \sigma_3$. Для определения коэффициента бокового давления как при кратковременном, так и при длительном действии нагрузки производят сжатие образца нагрузкой P без возможности бокового его расширения, т. е. при поперечной деформации $\epsilon_2 = \epsilon_3 \approx 0$. В этих условиях в образце развивается боковое давление (распор) p_6 . Зная величину P и измеряя величину p_6 , вычисляют коэффициент бокового давления

$$\xi = p_6 / P.$$

Для установления влияния вертикальной нагрузки на величину коэффициента бокового давления образец нагружают 5—10 ступенями вертикальной нагрузки и измеряют соответствующее им боковое давление, по этим данным строят график, показанный на рис. V-20.

В зависимости от физического состояния горных пород, их плотности и прочности применяют стабилметры, позволяющие создавать малое, среднее, высокое и сверхвысокое боковое давление (см. § 11).

Для определения коэффициента бокового давления методом трехосного сжатия необходимо иметь следующее оборудование: 1) стабилметр, соответствующий определенному физическому состоянию горных пород; 2) оборудование для изучения петрографических особенностей и физического состояния пород; 3) журнал для записи наблюдений (см. табл. V-4).

Последовательность определения

1. Для определения коэффициента бокового давления методом трехосного сжатия изготавливают образцы цилиндрической формы диаметром 3,5—5 см и высотой, равной 1,5—2 диамет-

рам образца. Значительно реже применяют стабилотметры с диаметром образцов до 10 см и больше. Образцы должны быть типичными для данной пробы — типа пород естественного сложения и влажности или физического состояния, соответствующего условиям предстоящей работы. Торцы образцов должны быть строго параллельны. Сечение и высоту образцов измеряют штангенциркулем с точностью до 0,1 мм.

2. Для каждой серии образцов, по которым исследуют деформационные свойства горных пород, составляют полную характеристику их петрографических особенностей и физического состояния, т. е. плотности, пористости и влажности (см. гл. I, рис. 1-1). Чтобы изготовленные образцы до испытаний не высушались, их хранят в эксикаторе, на дно которого наливают воду.

3. Готовый к испытаниям образец покрывают тонкой резиновой оболочкой и помещают в камеру стабилотметра между верхним и нижним штампами. Затем стабилотметр собирают, заливают водой и подготавливают для проведения испытаний в том порядке, как указано ниже, в § 11.

4. Испытание образца горной породы в стабилотметре производят несколькими ступенями вертикальной нагрузки. Число и величину ступеней нагрузки устанавливают до начала опытов в зависимости от физического состояния и прочности пород и от решаемых задач. Песчаные и глинистые слабые породы обычно испытывают нагрузками 0,1—0,25—0,5—0,75—1,0—1,5—2,0 кгс/см² (0,01—0,025—0,05—0,075—0,1—0,15—0,2 МПа), а более плотные нагрузками 0,5—1,0—2,0—3,0—4,0—6,0 кгс/см² (0,05—0,1—0,2—0,3—0,4—0,6 МПа). При испытаниях полускальных пород создают осевые нагрузки в десятые доли и единицы мегапаскалей. Первая ступень нагрузки должна быть не меньше природной. Каждую новую ступень вертикальной нагрузки прикладывают после измерения соответствующего бокового давления, вызванного предыдущей ступенью вертикальной нагрузки. Боковое давление измеряют по показаниям манометра или устанавливаемыми на образце тензометрическими датчиками (см. § 2).

В процессе выполнения испытаний соблюдают условие невозможности бокового расширения образца, т. е. чтобы $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 \approx 0$. Для этого необходимо при каждой вертикальной нагрузке сохранять неизменным боковое давление, т. е. сохранять равенство $p_6 = \xi P$. Так как боковое давление в камере стабилотметра создается водой или другой жидкостью, практически несжимаемыми, то при сохранении его неизменным не должно происходить бокового расширения образца.

5. Для определения коэффициента бокового давления при длительном действии вертикальной нагрузки образец 8—10 ч выдерживают под постоянной вертикальной нагрузкой при ус-

Т а б л и ц а V-4. Журнал для определения коэффициента бокового давления горных пород методом трехосного сжатия

Лабораторный номер	№ п/п	Вертикальная нагрузка		Боковое давление		Коэффициент бокового давления	Примечание
		общая, кгс (Н)	удельная, кгс/см ² (МПа)	общее, кгс (Н)	удельное, кгс/см ² (МПа)		
							Диаметр образца, см; длина образца, см; ρ , г/см ³ ; W , %

ловии невозможности бокового расширения и затем измеряют боковое давление.

6. Испытание рыхлых несвязных и мягких связных пород нарушенного сложения производят при определенных плотности и влажности. Для этого изготавливают образцы соответствующим образом.

7. Все наблюдения, производимые при испытаниях, записывают в журнал определенной формы (табл. V-4) и изображают в виде графика (см. рис. V-20).

§ 5. КОЭФФИЦИЕНТ СЖИМАЕМОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СЖИМАЕМОСТИ ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Компрессионные испытания пород естественного сложения

При исследовании деформационных свойств песчаных и глинистых пород наиболее часто производят их испытание на компрессию, при котором происходит деформация уплотнения пород без возможности бокового расширения. Сущность этих испытаний заключается в том, что породе подвергают уплотнению ступенями нагрузки (σ_1 , σ_2 , σ_3 и т. д.) в рабочем кольце специального компрессионного или компрессионно-фильтрационного прибора и наблюдают за изменением ее пористости или коэффициента пористости. В результате получают весьма характерную зависимость, которую выражают обычно в виде компрессионной кривой (рис. V-21). Из этой кривой видно, что

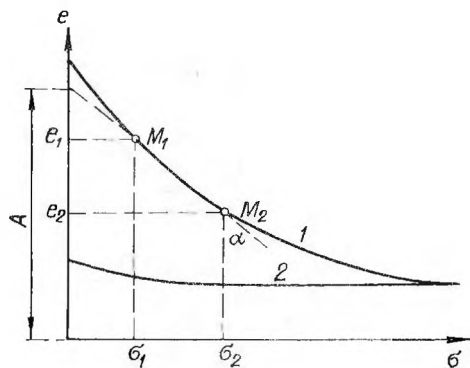


Рис. V-21. Компрессионная кривая.

1 — кривая уплотнения; 2 — кривая разуплотнения.

определенной нагрузке σ_1 соответствует определенный коэффициент пористости породы e_1 . При увеличении нагрузки до σ_2 соответственно уменьшается коэффициент пористости породы до e_2 . Если изменение давления

будет мало, т. е. $\sigma_2 - \sigma_1 = d\sigma$, то и коэффициент пористости изменится мало, т. е. $e_1 - e_2 = de$. На малом участке компрессионной кривой от M_1 до M_2 ее можно считать прямой. Тангенс угла наклона этого участка кривой характеризует сжимаемость породы на данном интервале давления:

$$\operatorname{tg} \alpha = (e_1 - e_2) / (\sigma_2 - \sigma_1) = de / d\sigma.$$

Чем больше величина $\operatorname{tg} \alpha$, тем порода слабее, так как она более податлива, сильнее уплотняется в пределах заданного интервала давлений. Тангенс угла наклона компрессионной кривой, т. е. $\operatorname{tg} \alpha$, принято обозначать через a и называть коэффициентом сжимаемости. Следовательно, это угловой коэффициент, выражающий зависимость пористости от нагрузки. Так как e — отвлеченное число, а единицы измерения σ — килограмм-сила на квадратный сантиметр или мегапаскаль, то единицы измерения a — квадратный сантиметр на килограмм-силу или мегапаскаль в минус первой степени (МПа^{-1}). Приближенно можно считать, что если при небольших нагрузках — $0,5$ — 5 кгс/см² ($0,05$ — $0,5$ МПа) на песчаные и глинистые породы коэффициент a выражается единицами и десятными долями единицы, породы являются чрезмерно сильносжимаемыми и сильносжимаемыми, если a составляет сотые доли единицы, — среднесжимаемыми, и если a выражается тысячными долями единицы, — слабосжимаемыми [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.].

Выбор точек M_1 и M_2 на компрессионной кривой при определении коэффициента сжимаемости a не может быть случайным, этот выбор должен подчиняться определенному правилу. Координаты точки M_1 должны соответствовать естественной природной нагрузке на породу σ_1 и естественному коэффициенту пористости e_1 . Координаты точки M_2 должны соответствовать конечной нагрузке на породу σ_2 после возведения сооружения. По конечной нагрузке σ_2 на компрессионной кривой находят значение e_2 .

При определении конечной нагрузки необходимо иметь в виду, что она должна удовлетворять следующему равенству:

$$\sigma_2 = g - h\rho,$$

где g — нагрузка от проектируемого сооружения, МПа; h — глубина заложения подошвы фундамента сооружения, см; ρ — плотность породы, залегающей выше подошвы фундамента сооружения, кг/м³.

Величина $g - h\rho$ обозначает фактически ту дополнительную нагрузку, которую порода воспримет после возведения сооружения.

Мерой компрессионной способности породы может быть также коэффициент относительной сжимаемости a_0 , выражающий относительную деформацию породы, т. е. представляющий собой величину сжатия слоя породы от нагрузки σ , отнесенную к первоначальной мощности слоя. Часто коэффициент относительной сжимаемости определяют как величину сжатия слоя породы мощностью 1 м под нагрузкой σ (кгс/см² или МПа). Этот показатель выражают в процентах или миллиметрах на метр (осадка, в миллиметрах, слоя породы мощностью 1 м).

Коэффициент относительной сжимаемости может быть вычислен по формуле

$$a_0 = 100\Delta h/h,$$

где a_0 — коэффициент относительной сжимаемости, %; Δh — величина, на которую изменилась высота образца породы при полной стабилизации ее уплотнения от данной нагрузки; h — первоначальная высота испытуемого образца породы.

Испытания пород на компрессию производят по нормальному и специальному схемам. Нормальная схема испытаний описана ниже. Она дает общую характеристику деформационных свойств пород и позволяет определять величину эффективной нагрузки (прочность структурных связей), коэффициент сжимаемости, коэффициент относительной сжимаемости, модуль общей деформации, скорость уплотнения породы под той или иной нагрузкой и силу набухания. Кроме того, нормальная схема позволяет выявить, какую часть в общей деформации уплотнения составляют остаточные и обратимые деформации. Она позволяет судить о естественной уплотненности породы, т. е. является ли порода недоуплотненной, нормально уплотненной или переуплотненной [Ломтадзе В. Д., 1952, 1970, 1986 г.]. Предварительное испытание пород на компрессию по нормальной схеме необходимо и для определения методики исследования их прочностных свойств (сопротивления сдвигу). Таким образом, исследование механических свойств пород песчаных и особенно глинистых почти всегда должно начинаться с испытания их на компрессию по нормальной схеме.

Специальные схемы испытаний применяют при решении специальных вопросов, связанных с особенностями проектируемых сооружений или с особенностями состава, состояния и свойств пород; например, при исследовании пород нарушенного сложения, просадочности лёссовых пород, набухающих пород и т. д. Методика и режим специальных исследований определяются особо, они должны возможно точнее моделировать условия работы породы под воздействием нагрузки сооружения или при изменении условий окружающей среды.

Для определения коэффициента сжимаемости и коэффициента относительной сжимаемости песчаных и глинистых пород необходимо иметь следующее оборудование: 1) компрессионный или компрессионно-фильтрационный прибор; 2) оборудование для определения влажности и плотности горных пород (см. гл. III); 3) пресс рычажный; 4) часы; 5) журнал определенной формы (см. табл. V-5).

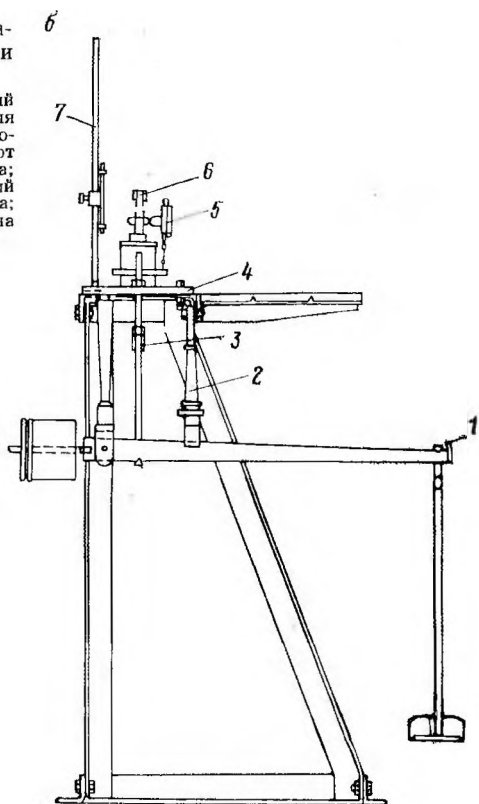
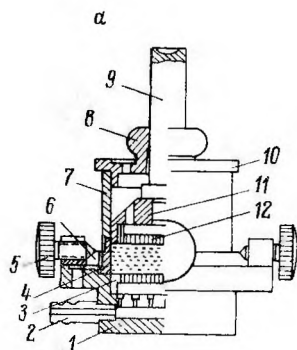
Существует несколько типов компрессионных приборов различных конструкций, однако принципиальная схема всех приборов почти одинакова. Компрессионные приборы, приспособленные для выполнения испытаний пород на фильтрацию, называются компрессионно-фильтрационными (см. гл. IV, § 11). В настоящем руководстве приводится описание только самых распространенных типов таких приборов. На рис. V-22, а показан прибор Н. Н. Маслова.

Основой прибора является база, представляющая собой круглую пластину 1, с верхней стороны которой выточено круглое углубление. По дну углубления нарезаны кольцевые канавки, соединяющиеся друг с другом и с двумя отверстиями, расположенными с двух противоположных сторон базы. В эти отверстия вделаны штуцера 2. Кольцевые канавки с поверхности прикрыты пористым камнем или металлической решеткой 3. С двух или четырех сторон базы имеются два или четыре выступа с прижимными винтами 5.

На базе 1 установлен цилиндр 7 с внутренним диаметром 7 см и высотой 6 см, нижняя часть которого высотой 2 см отвинчивается и служит рабочим кольцом 4 для испытуемой породы. Площадь рабочего кольца равна 40 см². На цилиндр надевается кольцо 6, с помощью которого оно прижимными винтами 5 с рабочим кольцом 4 прочно закрепляется на базе 1. Внутри цилиндра вставлен конический штамп 11 с пористым камнем или металлической решеткой 12, шток которого 9 выступает из цилиндра. Цилиндр сверху прикрывается крышкой 10, имеющей направляющую головку 8, через которую пропускается шток штампа 9. Внутри штока высверлен канал, соединяющийся с боковым отверстием, расположенным в верхней части штока. На шток штампа надевается муфта, на которой закрепляются индикаторы часового типа (см. рис. V-6) для из-

Рис. V-22. Компрессионно-фильтрационный прибор конструкции
Н. Н. Маслова.

a — общий вид прибора; *б* — рычажный пресс; 1 — пресс; 2 — упорный винт для предупреждения набухания образца породы; 3 — тяга для передачи давления от рычага на шток прибора; 4 — станина; 5 — индикатор для измерения деформаций при уплотнении; 6 — загрузочная рамка; 7 — пьезометр для испытаний породы на фильтрацию.



мерения деформаций породы при ее уплотнении. Ножка индикатора при испытаниях ставится на выступ базы прибора.

Простота сборки и разборки прибора Маслова — очень важное его преимущество. При загрузке прибора испытуемой породой образец вырезается кольцом прибора 4, на которое для этой цели иногда навинчивается специальное режущее кольцо. Для уплотнения породы при компрессионных испытаниях прибор с загруженным в него образцом породы помещают под пресс. Один из таких рычажных прессов с отношением плеч 1 : 10 изображен на рис. V-22, б. На рис. V-23 показана станина (на ней монтируются 4 рычажных прессы), которая с компрессионно-фильтрационными приборами составляет самостоятельную компрессионную установку.

Второй широко распространенный тип компрессионно-фильтрационных приборов — это прибор конструкции Гидропроекта (рис. V-24, а). Этот прибор выпускает наша промышленность.

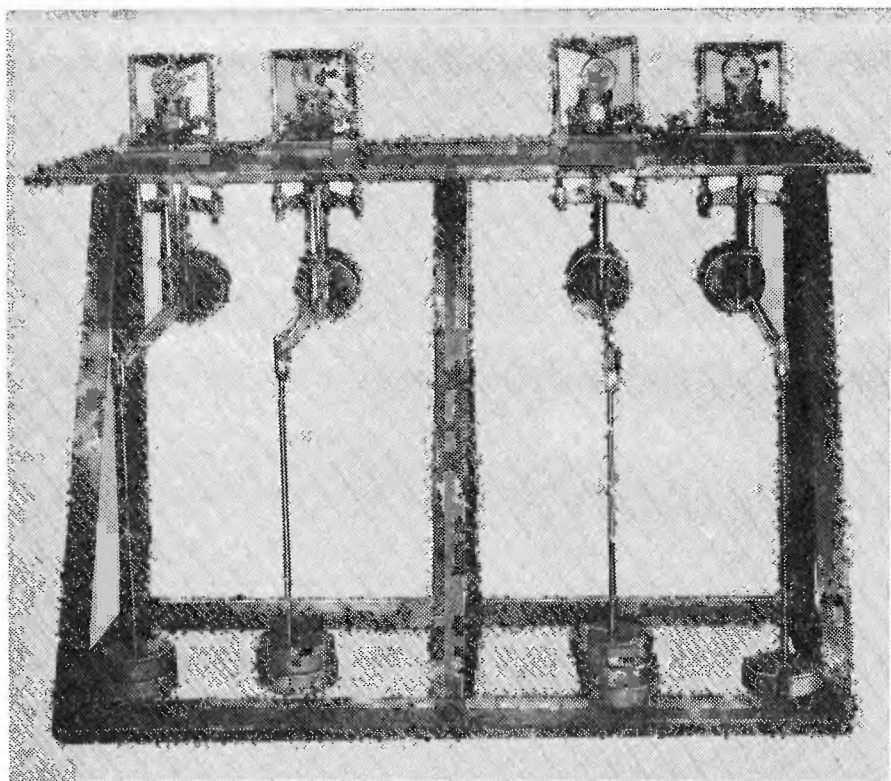


Рис. V-23. Компрессионная установка с четырьмя компрессионно-фильтрационными приборами.

Его основой служит база 6, с верхней стороны которой, как и в приборе Маслова, выточено круглое углубление, которое с поверхности прикрыто металлической решеткой 4. С боков базы имеются два отверстия, в которые вделаны штуцера 3 (к ним присоединяют пьезометры при испытании пород на фильтрацию) и три выступа с прижимными винтами 2. На базе 6 устанавливают цилиндр 5, внутрь которого сверху ввинчивают направляющее кольцо 9. Снизу внутрь цилиндра вставляют рабочее кольцо 7, на которое сверху предварительно устанавливают предохранительное кольцо 8. Рабочее кольцо имеет высоту 25 мм, внутренний диаметр 87,4 мм и площадь 60 см². Каждый прибор имеет запасные рабочие кольца высотой 17 и 35 мм, которые используют при испытаниях плотных и более слабых пород. На цилиндр 5 надевают кольцо 1, с помощью которого прижимными винтами 2 цилиндр прочно закрепляют на базе.

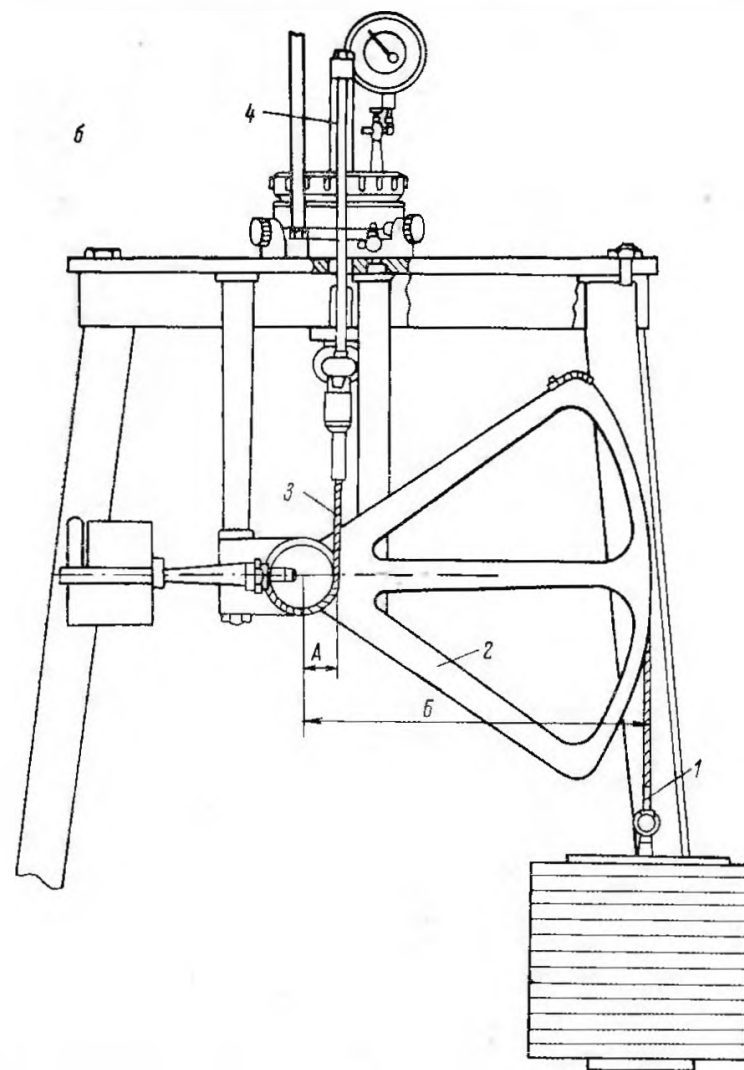
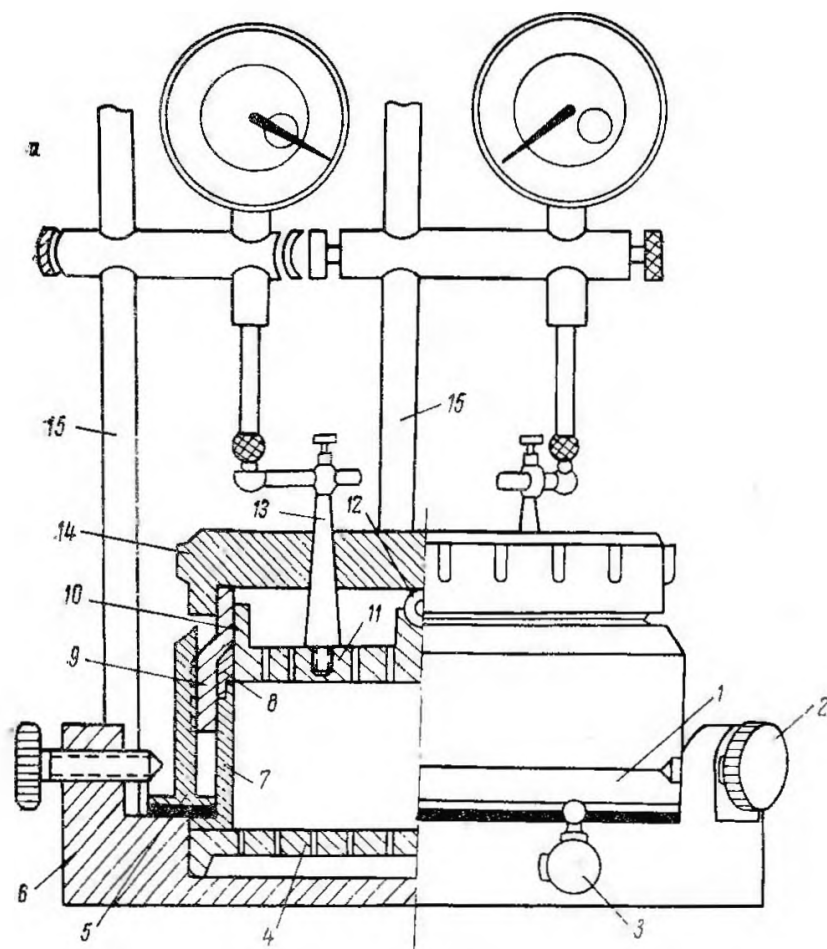


Рис. V-24. Компрессионно-фильтрационный прибор конструкции Гидропроекта.

а — общий вид прибора; б — рычажный пресс секторного типа: 1 — подвеска для грузов; 2 — секторный рычаг с противовесом; 3 — тяга; 4 — нагрузочная рамка.

Рабочее, предохранительное и направляющее кольца образуют цилиндрическую поверхность внутренней части прибора, куда вставляют штамп 10 с металлической решеткой 11. Штамп имеет гнездо для шарика 12, на который опирается шток пресса при испытаниях породы на сжатие, и две стойки 13, на которые опираются измерительные стержни тензометров (индикаторов) часового типа для измерения деформаций образца породы, загруженной в рабочее кольцо. Индикаторы крепятся на кронштейнах 15, установленных на базе прибора. На направляющее кольцо 9 сверху навинчивают арретирное кольцо 14, ограничивающее возможность набухания породы при испытаниях. В комплект прибора конструкции Гидропроекта входит рычажный пресс секторного типа с отношением плеч $A:B=1:10$ (рис. V-24, б).

Каждый прибор имеет соответствующий набор гирь, позволяющий вести уплотнение породы определенными ступенями нагрузки.

Последовательность определения

1. Для определения коэффициента сжимаемости и коэффициента относительной сжимаемости пород естественного сложения и влажности монолит вскрывают и проверяют его сохранность и пригодность для испытаний. Он не должен иметь следов нарушения естественного сложения — трещин, смятий и др.

2. Из монолита вырезают образец размером, точно соответствующим высоте и диаметру рабочего кольца прибора. Вырезание образца выполняют с помощью рабочего кольца способом, описанным выше (см. гл. III, § 3). Предварительно при помощи штангенциркуля измеряют внутренний диаметр и высоту рабочего кольца и вычисляют его объем. Затем кольцо взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г. После взятия образца породы кольцом тщательно выравнивают торцы острым прямым ножом или металлической линейкой вровень с краями кольца. Необходимо следить за тем, чтобы порода полностью заполнила кольцо, т. е. чтобы не было зазоров между породой и стенками кольца.

При испытаниях пород естественного сложения образцы должны загружаться в рабочее кольцо прибора ориентированными так же, как они залегают в естественных условиях, т. е. чтобы верх и низ соответствовали залеганию породы в естественных условиях.

3. Измеряют высоту образца микрометром с точностью до 0,01 мм и затем кольцо с породой взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г для определения плотности породы. Параллельно с этим определяют плотность породы методом парафинирования (гл. III, § 3) по образцу, вырезанному из того

же участка монолита. Совпадение данных определения плотности двумя методами свидетельствует о правильности загрузки рабочего кольца прибора. Одновременно из монолита отбирают пробы для определения влажности породы и плотности ее минеральной части.

4. Перед сборкой прибора штуцера у базы закрывают пробками или резиновыми трубками с зажимами. Затем базу прибора заливают водой до верхней поверхности пористого камня или металлической решетки. Воду желательно применять ту, воздействию которой в природных условиях порода подвергается или будет подвергаться. При отсутствии такой воды применяют дистиллированную воду. Породу в кольцо с обеих сторон покрывают влажной фильтровальной бумагой, затем кольцо свинчивают с цилиндром (прибор Маслова) или ставят его внутрь цилиндра снизу с предварительно установленным предохранительным кольцом (прибор Гидропроекта) и осторожно устанавливают на базу. На цилиндр надевают прижимное кольцо и закрепляют его на базе прижимными винтами. В цилиндр вставляют штамп, который опускают на породу. В зависимости от типа прибора цилиндр сверху закрывают крышкой или (в приборе Гидропроекта) на направляющее кольцо сверху навинчивают арретирное кольцо. Устанавливают индикаторы для измерения деформаций, стрелки которых перед началом испытаний ставят на нуль. Этим заканчивается сборка прибора и подготовка породы к испытаниям.

5. Прибор устанавливают под пресс, рычаг которого при этом приводится в горизонтальное положение с помощью уравнительного противовеса. В зависимости от поставленных задач испытание породы на сжатие может производиться при ее естественной влажности или после насыщения водой. При испытании породы без насыщения для сохранения ее естественной влажности на штамп и выступ базы вокруг цилиндра укладывают влажную вату или марлю. При испытаниях породы с предварительным насыщением водой штамп прибора закрепляют арретирным кольцом или упорным винтом на рычаге прессы.

Затем прибор заливают водой и при закрепленном штампе породу выдерживают до пяти суток для полного ее насыщения. Закрепление штампа предупреждает набухание породы при ее увлажнении, о чем судят по показаниям индикаторов. Породы, степень насыщения которых водой более 0,95—0,98, можно испытывать на сжатие сразу же после заливки прибора водой. Переуплотненные породы при нагрузках меньше природной подвергают испытаниям при естественной их влажности во избежание сильного набухания. При достижении природной нагрузки испытания таких пород, как и обычных, продолжают под водой.

6. Приступают к непосредственному выполнению испытания породы для определения ее коэффициента сжимаемости и коэффициента относительной сжимаемости. При этом проверяют показания индикаторов, имея в виду, что при неполном закреплении штампа некоторые породы после увлажнения набухают и индикаторы фиксируют прирост высоты образца. В таких случаях следует нажать арретирным кольцом или упорным винтом на штамп до предела, пока индикаторы не покажут начальный отсчет — нуль, т. е. отсчет до увлажнения породы в приборе.

В дальнейшем ход опыта состоит в уплотнении породы ступенями нагрузки и определении коэффициента ее пористости, соответствующей каждой ступени нагрузки. Число и размер ступеней нагрузок устанавливают до начала опыта в зависимости от предъявляемых требований и исходя из необходимости получения плавной — нормальной кривой уплотнения и разуплотнения. Конечная ступень нагрузки определяется величиной дополнительной нагрузки, которую порода получит на проектной отметке или на интересующей глубине после возведения сооружения. Слабые породы испытывают при нагрузках 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,2; 0,3 МПа, а более плотные при нагрузках 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6 МПа.

Величину груза, который необходимо приложить на рычаг пресса при заданной удельной нагрузке на породу, вычисляют по формуле

$$P = (\sigma F - g) L,$$

где P — общая нагрузка, приложенная к рычагу пресса, кгс (Н); σ — заданная удельная нагрузка на породу, кгс/см² (МПа); F — площадь образца, см²; g — масса штампа с шариком, кронштейном и индикаторами, закрепленными на штоке, кг; L — передаточное число системы рычага.

Для создания первоначального удельного давления на образец породы, равного, например, 0,25 кгс/см² (0,025 МПа), в установке Гидропроекта на подвеску рычага должен быть положен груз 1,27 кг, который вместе с массой нагрузочной рамки создает усилие на штамп прибора

$$1,27 \cdot 10 + 2,3 = 15 \text{ кгс или } 15 \text{ кгс}/60 \text{ см}^2 = 0,25 \text{ кгс/см}^2 (0,025 \text{ МПа}).$$

7. Первую ступень нагрузки на породу прикладывают небольшими долями от 0,05 до 0,1 кгс/см² в зависимости от физического состояния породы до того момента, пока индикаторы не зафиксируют первую ее деформацию. Эта нагрузка называется эффективной, так как она необходима для преодоления прочности структурных связей или для уравнивания внутренних напряжений в породе. Определив эффективное давление, нагрузку на породу доводят до величины первой ступени.

Под этой нагрузкой, как и под каждой последующей, породу выдерживают до стабилизации уплотнения. Стабилизация уплотнения породы считается законченной, если последние три отсчета по индикаторам были одинаковыми или если деформация породы от нагрузки не превышала 0,01 мм за 15—18 ч.

Наблюдения за уплотнением породы ведут по индикаторам в следующем порядке: после приложения ступени нагрузки через 30 с, 1; 2; 5; 10; 20; 30 мин и в дальнейшем через каждый час до конца рабочего дня. В следующие дни наблюдения производят дважды, т. е. в начале и конце рабочего дня. Для получения более полной характеристики уплотнения породы загрузку прибора, а также приложение каждой новой ступени нагрузки на породу следует производить в первой половине рабочего дня.

8. После стабилизации уплотнения породы от первой и последующих ступеней нагрузки определяют коэффициент пористости породы, соответствующий каждой нагрузке. Определение коэффициента пористости породы при компрессионных испытаниях можно производить несколькими методами: 1) весовым, 2) высотным, 3) высотно-весовым, 4) методом непосредственного определения пористости.

9. Весовой метод применим для пород, полностью насыщенных водой. Коэффициент пористости определяют по изменению влажности породы после стабилизации ее уплотнения от каждой ступени нагрузки по формуле $e = W/\rho_m$. При этом влажность W определяют следующим образом. После стабилизации уплотнения породы от той или иной ступени нагрузки прибор освобождают из-под пресса, быстро разбирают и извлекают рабочее кольцо прибора с породой. Затем кольцо с породой с поверхности насухо вытирают, очищают и взвешивают на технических весах с точностью до 0,01 г (масса g_2).

Взвесив кольцо с породой, ее с обеих сторон покрывают той же влажной фильтровальной бумагой, прибор вновь собирают, устанавливают под пресс, загружают прежней нагрузкой и заливают водой. Выдержав породу под этой нагрузкой некоторое время (1—2 ч), прикладывают следующую ступень нагрузки и опыт продолжают в том же порядке. После последней ступени нагрузки кольцо с породой взвешивают, помещают в термостат и высушивают до постоянной массы при температуре 100—105 °С. Охладив кольцо с породой в эксикаторе, его взвешивают (масса g_3). Влажность породы, соответствующую каждой ступени нагрузки, вычисляют по формуле

$$W = (g_b - g_c)/g_c,$$

где g_b — масса влажной породы в объеме рабочего кольца прибора, равная массе $g_2 - g_1$ (g_2 — масса кольца с влажной породой; g_1 — масса кольца); g_c — масса сухой породы, равная

массе $g_3 - g_1$ (g_3 — масса кольца с сухой породой, определенная в конце опыта, т. е. масса высушенной породы с кольцом после стабилизации уплотнения породы от последней ступени нагрузки).

Определив влажность породы, вычисляют значение коэффициента пористости, соответствующее каждой ступени нагрузки.

10. Высотный метод применим для пород различной влажности, водонасыщенных и водоненасыщенных. Он основан на том, что уплотнение породы практически возможно только за счет изменения пористости. Каждое новое значение коэффициента пористости после уплотнения породы той или иной ступенью нагрузки равно $e_2 = e_1 - \Delta e$. Объем минеральной части породы при этом до и после уплотнения не изменяется, т. е. $m_1 = m_2$ или

$$\frac{1}{1 + e_1} hF = \frac{1}{1 + e_2} (h - \Delta h) F,$$

где h и F — соответственно высота и площадь испытываемого образца породы в приборе; Δh — изменение высоты образца породы при изменении ее пористости от e_1 до e_2 при увеличении нагрузки от σ_1 до σ_2 .

Раскрывая скобки и группируя члены, имеем

$$h(1 + e_2) = h - \Delta h(1 + e_1)$$

или

$$\Delta h(1 + e_1) = h(e_1 - e_2),$$

но

$$e_1 - e_2 = \Delta e,$$

тогда

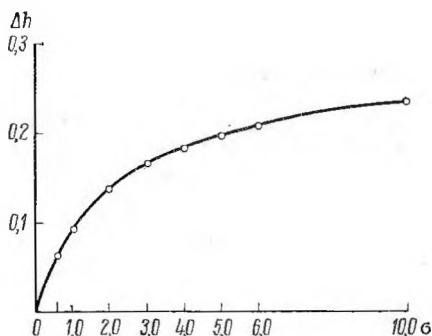
$$\Delta e = (\Delta h/h)(1 + e_1).$$

Соответственно

$$e_2 = e_1 - (\Delta h/h)(1 + e_1).$$

Таким образом, определяя изменение высоты образца породы в приборе в процессе ее уплотнения, получают значение коэффициента пористости, соответствующее каждой ступени нагрузки. При вычислении коэффициента пористости должна быть внесена поправка на деформацию прибора, для чего каждый прибор периодически тарируют. Тарировку производят так же, как и компрессионные испытания. Вместо породы в прибор закладывают специальный металлический диск и два бумажных фильтра, затем производят загрузку прибора ступенями и измеряют его деформацию по индикаторам при каждой ступени нагрузки. По полученным данным строят график (рис. V-25), которым пользуются при расчете действительной деформации образца породы. Она равна разнице между деформацией

Рис. V-25. Кривая тарировки компрессионного прибора.



цией, зарегистрированной индикаторами при испытаниях, и деформацией прибора, полученной при его тарировке.

11. Высотно-весовой метод основан на одновременном применении весового и высотного методов. При

этом пористость пород до опыта и после последней ступени нагрузки определяют весовым методом, а ее значения после каждой промежуточной ступени нагрузки — высотным методом. Этот метод, как и весовой, применим при испытании пород полностью водонасыщенных.

12. Наиболее надежный способ определения коэффициента пористости породы при компрессионных испытаниях — метод непосредственного определения ее пористости до и после опыта в сочетании с высотным методом. Пористость породы до и после опыта определяют через ее плотность и влажность. Плотность определяют методом режущего кольца, в качестве которого служит рабочее кольцо прибора. Высоту образца породы при этом измеряют микрометром с точностью до 0,01 мм. Параллельно с этим до опыта определяют плотность породы методом парафинирования образца, вырезанного из того же участка монолита. Как уже отмечено выше, совпадение этих данных свидетельствует о правильности загрузки рабочего кольца прибора. Влажность породы в кольце прибора до и после опыта определяют так же, как и при весовом методе.

При определении плотности породы после опыта необходимо учитывать ее упругую отдачу при снятии нагрузки. Для этого проводят наблюдения за показаниями индикаторов. Наблюдения за уплотнением породы по индикаторам, т. е. с помощью высотного метода, позволяют контролировать полученные данные по общему уплотнению породы и определять значение коэффициента пористости для промежуточных ступеней нагрузки.

13. После определения коэффициента пористости породы, соответствующего последней ступени нагрузки, прибор освобождают от породы, тщательно протирают и смазывают тонким слоем вазелина.

14. Если при компрессионных испытаниях породы необходимо получить кривую разуплотнения (обратную ветвь компрессионной кривой), то после достижения стабилизации

осадки от максимальной ступени нагрузки производят разгрузку прибора ступенями в обратном порядке, ведут наблюдения по индикаторам за деформацией разуплотнения породы. После стабилизации разуплотнения от каждой ступени нагрузки определяют соответствующие значения коэффициента пористости. После снятия последней ступени нагрузки породу оставляют в приборе до полного прекращения деформации разуплотнения. Определив влажность, плотность и коэффициент пористости породы, заканчивают испытания.

15. Обработка результатов испытания должна включать: построение кривых консолидации уплотнения породы, построение компрессионной кривой, вычисление коэффициента сжимаемости и коэффициента относительной сжимаемости и составление заключения по результатам испытаний.

16. Кривые консолидации породы строят для каждой ступени нагрузки (см. рис. IV-21). Они отражают зависимость между деформацией породы (величиной сжатия) и временем. Для построения кривых консолидации на оси абсцисс показывают время, а на оси ординат — значения коэффициента пористости или значения степени консолидации, вычисляемые по формуле

$$U = (\Delta h_t / \Delta h) \cdot 100,$$

где U — степень консолидации, %; Δh_t — величина, на которую изменилась высота образца породы по истечении времени t от начала опыта; Δh — величина, на которую изменилась высота образца породы при полной стабилизации ее уплотнения от заданной нагрузки.

17. Компрессионную кривую (см. рис. V-21) строят по конечным значениям коэффициента пористости породы после стабилизации ее уплотнения от каждой ступени нагрузки. Эти значения коэффициента пористости берут из журнала записи наблюдений или снимают с кривых консолидации. Компрессионную кривую можно строить также в другой системе координат, т. е. в системе, когда на оси ординат вместо значений коэффициента пористости показывают значения относительной деформации, а на оси абсцисс, как и в первом случае, — нагрузки. Такая система построения компрессионной кривой очень удобна при использовании ее для прогноза осадок сооружений.

18. Заключение по результатам проводимых испытаний должно состоять из оценки степени деформируемости — сжимаемости — пород, определения структурной прочности и оценки состояния в условиях естественного залегания. О степени сжимаемости пород судят по крутизне компрессионной кривой в пределах рассматриваемых интервалов нагрузок, по величине коэффициента сжимаемости и коэффициента относительной сжимаемости. Величина эффективной нагрузки характери-

Таблица V-5. Журнал для записи данных компрессионных испытаний пород

Лабораторный номер
Название породы
Сложение
Условия опыта

Номер прибора
Диаметр рабочего кольца
Площадь кольца
Высота кольца

1. Данные, относящиеся к началу и концу опыта

σ , кгс/см ² (МПа)	Вес кольца, гс (Н)	Вес кольца с влажной породой, гс (Н)	Вес влажной породы, гс (Н)	Вес кольца с сухой по- родой, гс (Н)	Вес сухой породы, гс (Н)	Влажность породы, %	Объем коль- ца, см ³	Плотность породы, г/см ³	Плотность скелета, г/см ³	Плотность минеральной части, г/см ³	Пористость $n = 1 - \frac{\rho_{ск}}{\rho_m}$	Коэффициент пористости $e = \frac{n}{1 - n}$	Полная пла- гоемость	Коэффициент плагонасы- щения	Примечание

2. Таблица подсчета коэффициента сжимаемости и коэффициента относительной сжимаемости породы

σ , кгс/см ² (МПа)	Δh	$\frac{\Delta h}{h}$	$\Delta e = \frac{\Delta h}{h} (1+e_i)$	$e_i = e_{i-1} - \Delta e$	$e_i - e_{i+1}$	$\sigma_{i+1} - \sigma_i$	$a = \frac{e_i - e_{i+1}}{\sigma_{i+1} - \sigma_i}$	$a_0 = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100$	Примечание

3. Журнал наблюдений за деформациями породы

Номер рычага

Дата	Нагрузка общая, кгс (Н)	σ , кгс/см ² (МПа)	Время измере- ния	Показания инди- каторов			Поправка на дефор- мацию прибора	Дефор- мация породы	Расчет консолидации			Приме- чание
				1	2	сред- нее			Время от начала приложения нагрузки, мин	Δh_i	U , %	

зует структурную прочность пород (прочность структурных связей), а сопоставление эффективной нагрузки с природной, которую порода испытывает от вышележащих масс в условиях естественного залегания, позволяет судить о ее состоянии, т. е. считать ее нормально уплотненной, переуплотненной или недоуплотненной [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.].

19. Для записи всех данных, получаемых в процессе подготовки и выполнения компрессионных испытаний, необходимо иметь журнал специальной формы (табл. V-5). Окончательные результаты испытаний заносят в сводную таблицу (приложение 3).

Компрессионные испытания пород нарушенного сложения

Во многих случаях, связанных с проектированием и строительством земляных сооружений — плотин, насыпей, дамб, отвалов, а также при строительстве сооружений на территориях, сложенных планомерно возведенными насыпями или намытых, необходимы данные о сжимаемости, деформационных свойствах песчаных и глинистых пород и закономерностях изменения этих свойств под влиянием нагрузки. Во всех этих случаях возникает необходимость в определении коэффициента сжимаемости и коэффициента относительной сжимаемости таких пород, но при нарушенном сложении. Определение коэффициента сжимаемости пород нарушенного сложения, как и естественного, производится по результатам компрессионных испытаний. Поэтому для таких испытаний необходимо аналогичное оборудование.

Последовательность определения

1. При компрессионных испытаниях породы нарушенного сложения готовят образцы заданной влажности W_1 и плотности ρ_1 следующим образом. Часть доставленной в лабораторию пробы породы объемом, в два-три раза больше объема рабочего кольца прибора, помещают в заранее взвешенную фарфоровую или металлическую чашку, разминают пестиком с резиновым наконечником до состояния однородной массы. Берут навеску из этой массы породы (нарушенного таким образом сложения) и определяют влажность W_0 .

2. Взвешивают чашку с растертой породой и, вычитая из полученной массы массу чашки, определяют массу содержащейся в ней породы g_0 (г). Массу g_1 (г), которую должна иметь порода в чашке при заданной влажности W_1 (%), вычисляют в зависимости от установленных значений W_0 и g_0 по формуле

$$g_1 = g_0 (1 + 0,01 W_1) / (1 + 0,01 W_0).$$

Если влажность породы в чашке W_0 будет меньше или больше заданной влажности W_1 , то добавляют в породу воды или подсушивают ее на воздухе до тех пор, пока ее масса не станет равной массе g_1 . Массу воды, которую надо добавить или удалить, определяют по разности масс g_0 и g_1 . После каждого добавления воды породу тщательно перемешивают; подсушивание также сопровождается перемешиванием.

3. Из приготовленной породы нарушенного сложения и заданной влажности W_1 вырезают образец рабочим кольцом прибора по способу, описанному выше. Масса образца породы g заданной влажности и плотности в объеме рабочего кольца прибора V (см³) должна быть равна

$$g = [V(1 + 0,01W_1)/(1 + e_1)]\rho_m,$$

где e_1 — коэффициент пористости породы заданной плотности; ρ_m — плотность минеральной части породы.

Следовательно, заданная плотность породы ρ_1 (г/см³) должна быть равна

$$\rho_1 = g/V.$$

4. Собирают прибор, подготавливают его для испытаний и проводят их так же, как и пород естественного сложения.

§ 6. МОДУЛЬ ОБЩЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Для определения модуля общей деформации выполняют специальные полевые и лабораторные исследования, но очень часто его вычисляют по данным компрессионных испытаний по формуле

$$E_0 = \beta(1 + e_1)/a,$$

где E_0 — модуль общей деформации, кгс/см² (МПа); e_1 — коэффициент пористости, соответствующий по компрессионной кривой нагрузке σ_1 ; a — коэффициент сжимаемости (см²/кгс или МПа⁻¹), определяемый по компрессионной кривой для интервала нагрузок от σ_1 до σ_2 ; β — множитель для перехода от сжатия без возможности бокового расширения при компрессионных испытаниях к сжатию, имеющему место в натуре (численно его принимают равным: для песков 0,76; для супесей 0,72; для суглинков 0,57; для глин 0,43).

Величина β определяется по коэффициенту поперечного расширения μ или коэффициенту бокового давления ξ по одной из следующих формул:

$$\beta = 1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \quad \text{или} \quad \beta = \frac{(1 - \xi)(1 + 2\xi)}{1 + \xi}.$$

Некоторые исследователи считают, что при определении модуля общей деформации по данным компрессионных испытаний необходимо вводить поправочный коэффициент, величина которого зависит от типа породы и изменяется от 1 до 2—4, в противном случае его значения будут заниженными.

§ 7. ПРОСАДОЧНОСТЬ ЛЕССОВЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Лёссовой (макропористой) породой называют особый петрографический тип континентальных глинистых пород, образовавшихся при определенных условиях изменения рыхлых осадков в климатических условиях недостаточного увлажнения, развития степной растительности, фауны и т. д. [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.]. Важнейшим обязательным диагностическим признаком лёссовых пород является их макропористость. Они обладают видимыми невооруженным глазом пустотами (макропорами), значительно превосходящими размер частиц породы, имеющими форму трубочек — канальцев, пронизывающих породу в вертикальном направлении.

Лёссовые породы отличаются от обычных глинистых. При замачивании без увеличения нагрузки они нередко дают значительные дополнительные осадки (просадки) провального характера. Основная причина просадочности лёссовых пород состоит в том, что под воздействием воды в них разрушаются структурные связи, происходит оплывание макропор и нарушается естественное строение и сложение. Поэтому без описания (характеристики) такого типа макропористости исследование лёссовых пород неполноценно и даже неграмотно. Выявление просадочности этих пород по данным компрессионных испытаний заключается в определении коэффициентов макропористости и относительной просадочности.

Если взять единицу объема лёссовой породы, то в ее сложении можно выделить объем скелета m , объем нормальных пор n' и объем макропор n'' . Сумма $n' + n''$ составляет общий объем пор n в единице объема породы. Коэффициент пористости такой породы равен

$$e_0 = n/m = (n' + n'')/m.$$

Отношение n'/m представляет собой коэффициент нормальной пористости породы; отношение n''/m , т. е. отношение объема макропор к объему скелета породы, называют коэффициентом макропористости и обозначают e_m . Для его определения производят компрессионные испытания лёссовых пород по методу одной кривой или по методу двух кривых (рис. V-26). Коэффициент макропористости по этим испытаниям вычисляют по формуле

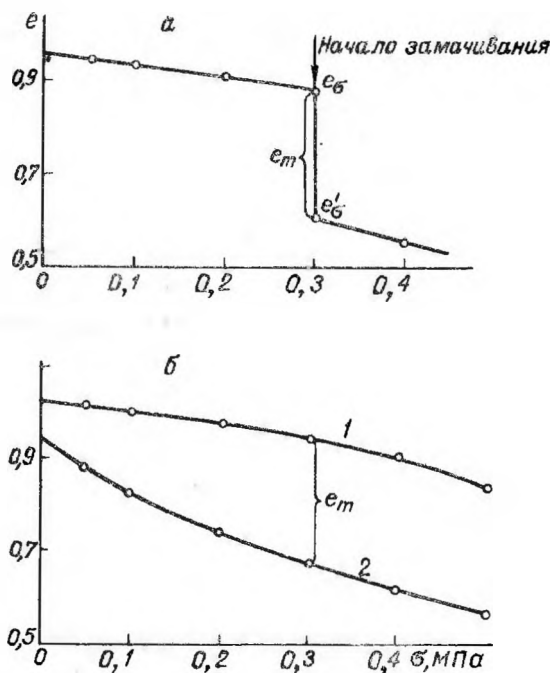


Рис. V-26. Компрессионные кривые лёссовых пород.

a — при испытании по методу одной кривой; b — при испытании по методу двух кривых: 1 — кривая для образца естественной влажности; 2 — кривая для образца, искусственно увлажненного.

$$e_m = e_0 - e'_0,$$

где e_0 — коэффициент пористости породы, уплотненной нагрузкой σ , кгс/см² (МПа) (см. рис. V-26); e'_0 — коэффициент пористости того же образца породы после искусственного увлажнения при той же нагрузке, кгс/см² (МПа).

Считают, что если коэффициент e_m больше нуля, то порода обладает просадочными свойствами; если e_m равен нулю или меньше нуля, порода обладает устойчивым сложением (образец не проседает, а иногда набухает). При оценке деформационных свойств пород удобно пользоваться значениями относительной деформации, т. е. коэффициентом относительной сжимаемости a_0 :

$$a_0 = \Delta h/h.$$

Для лёссовых пород необходимо знать величину относительной деформации породы от действия одного лишь замачивания, которую называют коэффициентом относительной просадочности

a_m . По аналогии с вышеприведенной формулой его вычисляют следующим образом:

$$a_m = a'_0 - a_0,$$

где a_0 — относительная деформация породы после уплотнения ее нагрузкой σ , кгс/см² (МПа); a'_0 — относительная деформация той же породы после искусственного увлажнения при той же нагрузке σ , кгс/см² (МПа). Коэффициент относительной просадочности равен

$$a_m = e_m / (1 + e_0).$$

Для определения коэффициента макропористости и коэффициента относительной просадочности необходимо иметь то же оборудование, что и при компрессионных испытаниях пород (см. § 6).

Последовательность определения

1. Детально ознакомившись с устройством компрессионного или компрессионно-фильтрационного прибора и методикой работы с ним, прибор подготавливают для проведения испытаний.

2. Для испытания на просадочность пригодны образцы лёссовых пород только естественного сложения и влажности. Вырезывание образцов породы из монолита производят рабочим кольцом прибора, как режущим кольцом (см. гл. III, § 3). Образцы породы должны загружаться в прибор ориентированными, как в условиях естественного залегания.

3. При определении показателей просадочности лёссовых пород по методу одной кривой образец породы в компрессионном приборе уплотняют ступенями нагрузки 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 кгс/см² (0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 МПа). После каждой ступени нагрузки образец выдерживают до стабилизации осадки. Наблюдения за уплотнением породы ведут по индикаторам, как и при обычных компрессионных испытаниях, т. е. через 30 с, 1; 2; 5; 10; 20; 30 мин и в дальнейшем через каждый час до конца рабочего дня. В следующие дни наблюдения производят дважды — в начале и в конце рабочего дня.

4. После стабилизации уплотнения породы при нагрузке 3 кгс/см² (0,3 МПа) прибор заливают водой и, следовательно, замачивают образец породы при заданной нагрузке 3 кгс/см² (0,3 МПа). При этом наблюдения за уплотнением (просадочностью) ведут в том же порядке, как от каждой ступени нагрузки до стабилизации деформаций. Затем продолжают уплотнение породы ступенями нагрузки 4 и 6 кгс/см² (0,4 и 0,6 МПа). На этом испытание породы заканчивают. По полученным данным строят компрессионную кривую типа показанной на рис. V-26, а и определяют значения e_m и a_m .

5. При проектировании фундаментов сооружений часто оказывается недостаточным иметь данные только о просадочности лёссовых пород. Для этих целей необходимо знать также зависимость изменения величин e_m и a_m от давления. Для получения такой зависимости испытания ведут по методу двух кривых. В этом случае испытывают не один, а два образца породы, вырезанные из одного и того же монолита; один испытывают при влажности, соответствующей естественной, а второй — с замачиванием при нагрузке $0,5 \text{ кгс/см}^2$ ($0,05 \text{ МПа}$). Один образец испытывают на компрессию обычным способом, применяемым для глинистых пород, соблюдая меры, исключающие возможность подсыхания образца или его увлажнения. Второй образец испытывают на компрессию с искусственным замачиванием, начиная от давления $0,5 \text{ кгс/см}^2$ ($0,05 \text{ МПа}$). Уплотнение обоих образцов производят теми же ступенями нагрузки и наблюдения за их деформациями ведут, как и при проведении испытаний по методу одной кривой.

6. Результаты испытаний обоих образцов породы изображают в виде компрессионных кривых (рис. V-26, б) и по ним определяют значения e_m и a_m для каждой ступени нагрузки. Разница между значениями e_σ и e_σ' для каждой ступени нагрузки дает характеристику изменения коэффициента макропористости от нагрузки. Кривую изменения $e_m = f(\sigma)$ показывают совместно с компрессионными кривыми, она позволяет выявить, при какой уплотняющей нагрузке порода обладает максимальной просадочностью.

§ 8. СИЛА НАБУХАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ПРИ УВЛАЖНЕНИИ

Способность глинистых пород увеличивать свой объем при увлажнении называется набуханием (см. гл. IV, § 1 и 4). Одним из показателей набухания глинистых пород является давление набухания, или сила набухания. Эта величина определяется напряжением (единицы измерения — килограмм-сила на квадратный сантиметр или мегапаскаль), развивающимся в породе в результате ее набухания при увлажнении. Значения силы набухания зависят от ряда факторов. В лабораторных условиях влияние некоторых из них учесть нельзя, поэтому при таких испытаниях величину давления при набухании породы следует рассматривать как характеристику сравнительную. Для ее определения необходимо то же оборудование, что и для компрессионных испытаний пород (см. § 5).

Последовательность определения

1. Порода для испытания на набухание может быть естественного сложения и влажности или нарушенного сложения

в зависимости от целей исследований. Силу набухания в лабораторных условиях в большинстве случаев определяют в компрессионных приборах.

2. Вырезывание образца породы для испытания производят рабочим кольцом прибора способом, описанным выше. Прибор собирают и устанавливают под пресс, рычаг которого при этом приводят в горизонтальное положение с помощью уравнильного противовеса. Одновременно с этим индикаторы неподвижно закрепляют на приборе, стрелки их устанавливают на нуль.

3. Прибор заливают водой и следят за показаниями индикаторов. После того как будет обнаружено набухание, породу начинают пригружать небольшими долями нагрузки и тем самым препятствовать набуханию. Пригрузку породы производят дробью или мелкими гирями. Максимальная нагрузка, сдерживающая набухание породы, и будет характеризовать давление набухания.

4. Давление набухания породы можно определять также после предварительного ее уплотнения той или иной нагрузкой.

§ 9. ПРОЧНОСТЬ СКАЛЬНЫХ, ПОЛУСКАЛЬНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Метод временного сопротивления сжатию

Прочность скальных, полускальных и глинистых пород определяется не только их петрографическими особенностями, величиной и характером действующей нагрузки, но и условиями ее приложения. В соответствии с этим для скальных и полускальных горных пород различают прочность на сжатие, растяжение и скалывание, а для мягких глинистых — на сжатие, растяжение и сдвиг (срез).

Прочность или, точнее, предел прочности горных пород на сжатие определяют по временному их сопротивлению при одноосном сжатии. Для определения прочности необходимо то же оборудование, что и при определении показателей упругих свойств таких пород. Описание этого оборудования приведено выше, в § 2.

Последовательность определения

1. Для определения прочности горных пород на одноосное сжатие в соответствии с международным стандартом должны изготавливаться образцы цилиндрической формы с отношением высоты к диаметру, равным единице. В качестве нормы рекомендуется цилиндр диаметром и высотой 42 мм. Отклонение от этих размеров допускается в пределах от 40 до 45 мм, а откло-

нение в отношении высоты к диаметру — до 5 %. Могут применяться также образцы в виде кубиков сечением $5 \times 5 \times 5$ см. Торцы образцов должны быть строго параллельными и шлифованными по лекальной линейке. При изготовлении образцов необходимо обращать особое внимание на точность шлифовки рабочих поверхностей и их параллельность, так как это влияет на равномерность распределения напряжений. Сечение и высоту образцов измеряют штангенциркулем с точностью до 0,1 мм.

2. Для каждой серии образцов, по которым исследуют прочностные свойства горных пород, составляют полную характеристику их петрографических особенностей и физического состояния, т. е. плотности, пористости, влажности и др. (см. гл. I, рис. I-1). Образцы, имеющие не свойственные для породы в целом дефекты (прослойки, жилки, пустоты, трещины и др.), должны отбраковываться.

3. Прочность скальных и полускальных пород обычно определяют в двух состояниях: в воздушно-сухом и в водонасыщенном. Образцы для этого изготавливают из одного и того же монолита (пробы). Прочность мягких глинистых пород определяют при естественной влажности.

Образцы породы, предназначенные для испытаний в воздушно-сухом состоянии, высушивают на воздухе до постоянной массы. Образцы породы, предназначенные для испытаний в водонасыщенном состоянии, увлажняют до полного насыщения водой. Для этого ставят образцы в чашку с дистиллированной водой так, чтобы они погружались в нее примерно на $\frac{1}{3}$ высоты. Через 6 ч образцы заливают водой до уровня их поверхности (не заливая их сверху) и оставляют в таком состоянии до полного насыщения водой в течение двух-трех суток. После этого их вынимают из воды, обтирают влажным полотенцем и подвергают испытанию на одноосное сжатие. Образцы естественной влажности подвергают испытаниям непосредственно после их изготовления.

4. Образец помещают под пресс между двумя стальными полированными пластинами — прокладками (обычно толщиной 3—4 см). Нагрузочную плиту или штамп прессы подводят к верхней прокладке и производят тщательную центровку образца на прессе. Для того чтобы нагрузка прикладывалась строго по оси образца, между штампом прессы и верхней прокладкой помещают шариковое центрирующее устройство. При необходимости измерения деформаций устанавливают в надлежащее положение тензометры (см. выше, § 2).

5. Временным сопротивлением горной породы при одноосном сжатии называется величина напряжения (килограмм-сила на квадратный сантиметр или мегапаскаль), вызывающая разрушение образца породы. Для его определения установлен-

Таблица V-6. Журнал для определения прочности горных пород по временному сопротивлению сжатию и растяжению

Лабораторный номер	Номер опыта	Состояние влажности образца породы	Ориентировка относительно слоистости или сланцеватости	Размер образца			Разрушающая нагрузка, кгс (Н)	Прочность, кгс/см ² (МПа)		Примечание
				Высота, см	Диаметр, см	Площадь поперечного сечения, см ²		отдельного образца	средняя	

ный под прессом образец постепенно нагружают вплоть до его разрушения и фиксируют максимальную нагрузку, при которой произошло разрушение образца. Скорость нагружения должна находиться в пределах 5—10 (кгс/см²)/с (0,5—1 МПа/с).

Для мягких глинистых и некоторых разностей полускальных пород, обладающих пластическим или хрупко-пластическим характером разрушения, за условный предел прочности на сжатие можно принимать напряжение, при котором остаточные деформации составляют 10—15 % первоначальной высоты образца.

6. По полученным данным вычисляют временное сопротивление горной породы при одноосном сжатии, или прочность на сжатие, $R_{сж}$ (кгс/см² или МПа), по формуле

$$R_{сж} = P_{\max}/F_0,$$

где $P_{\max}$ — общая максимальная нагрузка на образец в момент его разрушения, кгс (Н); F_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца, см².

Для каждой пробы горных пород производят не менее трех параллельных определений прочности, а затем вычисляют среднее значение. Образцы пород, имеющих слоистость, сланцеватость, полосчатость, т. е. явно анизотропных, при испытаниях ориентируют соответствующим образом — по слоистости и перпендикулярно к ней. Каждую из этих групп образцов испытывают отдельно.

В случае, если образец имеет отношение высоты к диаметру, отличное от 1, необходимо произвести пересчет по формуле

$$R_{сж} = 9R'_{сж}/(7 + 2d/h),$$

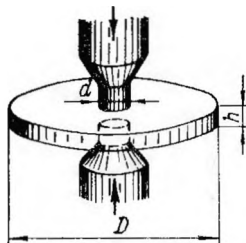


Рис. V-27. Нагружение образца горной породы при испытании на сжатие по методу соосных пуансонов.

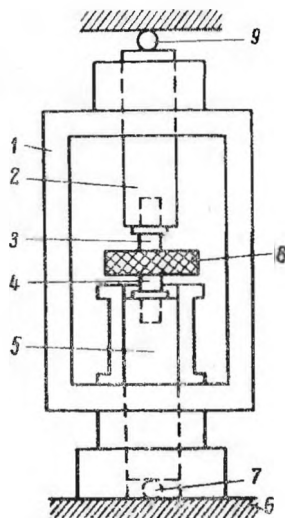


Рис. V-28. Схема приспособления (аксиатора) для испытания пород на сжатие соосными пуансонами.

где $R_{сж}$ — прочность на сжатие, соответствующая образцу с отношением $h/d=1$ — международная норма; $R'_{сж}$ — прочность на сжатие, определенная на образце с иным отношением h/d .

7. Цифровые данные записывают в журнал (табл. V-6), а окончательные результаты заносят в сводную таблицу (приложение 3).

Метод соосных пуансонов

Метод определения прочности скальных и полускальных пород на сжатие соосными пуансонами предложен Г. Н. Кузнецовым и Б. В. Матвеевым [1960 г.] для массовых исследований. Испытание пород этим методом производится путем сжатия образцов определенной формы (плоские пластины круглой формы — диски) между плоскими же торцами двух цилиндрических соосно расположенных пуансонов значительно меньшего диаметра (рис. V-27). Предел прочности на сжатие определяется по величине разрушающей нагрузки и диаметрам образца и пуансонов. Данные, получаемые этим методом, близки к данным стандартного метода, но применим он главным образом для пород однородных и не крупнозернистых. На рис. V-28 показана схема приспособления (аксиатора) для испытания по-

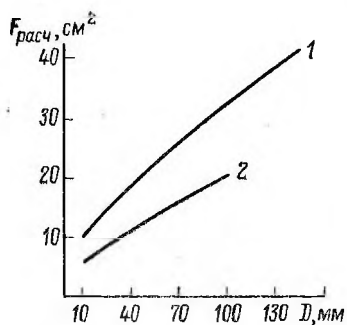


Рис. V-29. Номограмма для определения расчетной площади сечения образца $F_{\text{расч}}$. 1 — пуансоны 1,0 см²; 2 — пуансоны 0,5 см²; D — диаметр образца.

род на сжатие соосными пуансонами. В массивных основаниях стальной рамы 1 соосно проточены цилиндрические направляющие отверстия со шлифованными поверхностями. В отверстия помещают штоки 2 и 5, на сходящихся концах которых имеются выточки. В выточки вставляются съемные пуансоны 3 и 4, изготовленные из высококачественной стали. Контактные плоские поверхности пуансонов хорошо отшлифованы. Для испытания слабых пород обычно применяются пуансоны с площадью сечения 1,0 см², а для крепких пород — 0,5 см². Образец породы 8 помещают между пуансонами. Давление на штоки пресса передается через центрирующие шарики 7 и 9. Для центрирования и установки образца на прессе служит съемная круглая площадка 6.

Последовательность определения

1. Для испытаний изготавливают образцы в виде плоских пластин круглой формы диаметром от 30 до 100 мм, толщиной 11–12 мм с параллельными торцами. Такие образцы получают путем распиловки керна алмазной пилой.

2. В зависимости от испытания пород в воздушно-сухом или водонасыщенном состоянии образцы соответствующим способом подготавливают (см. начало § 9).

3. Для испытаний образец помещают в аксиатор между пуансонами так, чтобы они находились точно в центре образца. Аксиатор устанавливают под пресс и, постепенно, плавно увеличивая нагрузку на пуансоны, образец доводят до разрушения.

4. Прочность на сжатие $R_{\text{сж}}$ (МПа) вычисляют по формуле

$$R_{\text{сж}} = P/F_{\text{расч}},$$

где P — разрушающая нагрузка, кгс (Н); $F_{\text{расч}}$ — расчетная (приведенная) площадь сечения образца, зависящая от отношения D/d , т. е. отношения диаметра образца D к диаметру пуансонов d ; площадь $F_{\text{расч}}$ определяется по номограмме (рис. V-29).

Для каждой пробы горных пород производят не менее трех-пяти параллельных определений прочности, по которым вычисляют среднее значение.

Метод временного сопротивления растяжению

При проектировании и строительстве сооружений нередко непосредственный интерес представляет знание прочности на разрыв скальных, полускальных и глинистых пород. Основным методом определения прочности горных пород на разрыв является испытание их на временное сопротивление растяжению. На результаты таких испытаний кроме петрографических особенностей пород большое влияние оказывает форма образцов. Наиболее рациональная форма — в виде трапецеидальной восьмерки или усеченных конусов, сложенных вершинами. Однако изготовление таких образцов связано с большими трудностями. Поэтому при испытаниях скальных и полускальных пород, учитывая, что лабораторные данные для них имеют подчиненное значение [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.], в большинстве случаев используют образцы цилиндрической (керн) или призматической формы и только иногда для мягких глинистых пород изготавливают фасонные образцы. Однако и для таких пород вполне допустимо применение образцов цилиндрической или призматической формы.

Для выполнения таких испытаний необходимо следующее оборудование: 1) универсальная или разрывная испытательная машина с механическим или гидравлическим приводом (см. § 2) либо специальный прибор для испытаний пород на разрыв; 2) оборудование для определения влажности и плотности пород; 3) журнал для записи наблюдений.

На рис. V-30 показана рычажная установка для непосредственного испытания образца породы на разрыв, а на рис. V-31 — специальный прибор конструкции ВНИМИ. Этот прибор состоит из цилиндра 4, внутри которого помещают образец 6, заделанный концами в головки 5. Закрепление концов образца в головке осуществляется заливкой их сплавом Вуда 3. Разрыв образца производится давлением масла на заплечики головок, передаваемого через патрубок 8 в зазор между стенками цилиндра и головками. Перепуск масла под заплечики верхней головки осуществляется трубкой 1. Для предохранения боковой поверхности образца от давления на нее масла служит втулка 2, точно прилегающая к стенке цилиндра и головкам. Давление масла, нагнетаемого в прибор насосом, измеряется манометром 7.

Одним из простейших приборов для определения сопротивления глинистых пород разрыву является прибор Н. А. Цытовича (рис. V-32). Испытание породы на разрыв в этом приборе производится на образцах, имеющих форму трапецеидальной восьмерки. Вырезают образец специальной формой с разъемными боковыми стенками. Образец должен иметь длину 76 мм, ширину 20 мм и высоту 25 мм. Длина разрывной части вось-

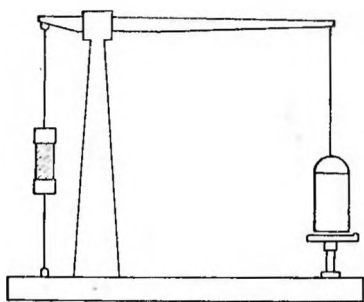


Рис. V-30. Рычажная установка для испытания образцов горных пород на разрыв.

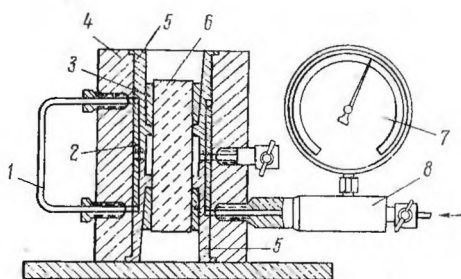


Рис. V-31. Схема прибора ВНИМИ для определения прочности пород при растяжении.

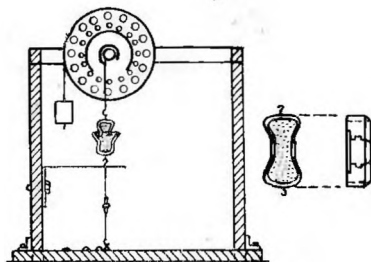


Рис. V-32. Прибор Н. А. Цыговича для определения прочности глинистых пород на растяжение.

мерки 25—30 мм. При таких размерах образца площадь плоскости разрыва равна примерно 5 см². Разрыв образца производится с помощью специального привода, имеющего двухступенчатый шкив с отношением диаметров шкивов 1 : 10. В качестве груза при испытаниях может быть использована вода или дробь.

Последовательность определения

1. Из монолита вырезают, выпиливают или выбуривают образцы цилиндрической или призматической формы диаметром от 30 до 50—70 мм или сечением от 30×30—50×50 до 70×70 мм. В качестве нормы могут быть рекомендованы образцы диаметром 43—45 мм. Длина образцов должна быть не менее полутора-двух диаметров. Если в лабораторию поступил керн, допускается при испытаниях использовать непосредственно куски керна. Из мягких глинистых пород иногда вытачивают на токарном станке или вырезают фасонные образцы (трапециевидные и др.). Сечение образцов в предполагаемой разрывной части измеряют штангенциркулем.

2. Испытания на разрыв очень чувствительны к различным дефектам породы (трещины, слоистость, сланцеватость, полосчатость, кавернозность и др.). Поэтому образцы должны быть типичными для породы в целом. Из каждой пробы изготавливают пять (но не менее трех) образцов, по результатам испытаний которых затем вычисляют значение предела прочности.

3. Для каждой пробы горных пород составляют полную характеристику их петрографических особенностей и физического состояния (плотность, пористость, влажность и др.).

4. Испытаниям могут подвергаться породы в воздушно-сухом, водонасыщенном состоянии или при естественной влажности. Поэтому образцы соответствующим образом подготавливают (см. начало § 9).

5. Усилия при растяжении передаются к образцу через специальные головки, по форме совпадающие с контурами образца. Это или разъемные кольца с дужками, в которых концы образца зажимаются через резиновую или свинцовую прокладку, или цилиндрические обоймы, в которых концы образца закрепляют сплавом Вуда, полимерным клеем либо стопорными винтами. Образец с закрепленными на его концах головками помещают в испытательную машину между верхним и нижним захватами (см. § 2), подвешивают на рычажной установке или устанавливают в прибор и нагружают. Растягивающая нагрузка увеличивается непрерывно и плавно до тех пор, пока не произойдет разрыв образца. В глинистых породах с поверхности разрыва берут пробу для определения ее влажности.

При нагружении образца особое внимание обращают на его центрировку. Растягивающее усилие должно прикладываться строго по оси образца. В противном случае даже небольшие перекосы сильно сказываются на результатах определения прочности горных пород на разрыв.

6. Определив максимальную нагрузку, при которой произошел разрыв образца, $P_{\max}$, и зная площадь первоначального сечения образца F_0 , вычисляют временное сопротивление породы растяжению R_p , кгс/см² (МПа), т. е. прочность ее на разрыв

$$R_p = P_{\max}/F_0.$$

7. Цифровые данные записывают в журнал (см. табл. V-6), а окончательные результаты — в сводную таблицу (приложение 3).

Метод раскалывания

Одним из распространенных методов определения прочности горных пород на разрыв является метод раскалывания. Это один из косвенных методов, но он позволяет получать резуль-

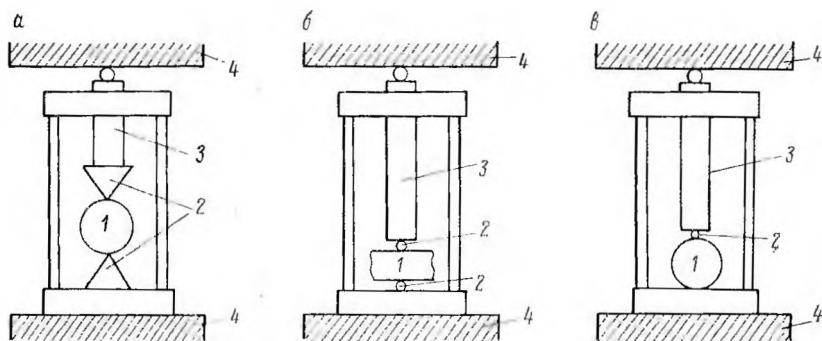


Рис. V-33. Схемы конструкций приборов для определения прочности пород на разрыв методом раскалывания.

а — с помощью клиньев; б, в — с помощью стержней.

таты, вполне сходные с результатами испытаний пород непосредственно на растяжение. Он применим главным образом для пород, обладающих хрупким характером разрушения, т. е. для скальных и некоторых разностей полускальных. Разработан этот метод ИГД им. А. А. Скочинского и ВНИМИ.

Сущность его состоит в испытании образца цилиндрической или пластинообразной формы на сжатие линейно сосредоточенной нагрузкой с двух сторон (между клиньями, стержнями и т. д.). Такая нагрузка вызывает разрыв образца на две части по поверхности, проходящей вдоль контакта породы с линейно сосредоточенной сжимающей нагрузкой.

Для выполнения таких испытаний необходимо то же оборудование, что и при определении прочности пород на сжатие (см. § 9), плюс специальный прибор для установки образца для раскалывания. На рис. V-33 показаны схемы конструкций таких приборов.

Последовательность определения

1. Для испытаний на раскалывание пригодны образцы в виде цилиндров (куски керна) и кубиков тех же размеров 1 что и при определении прочности пород на одноосное сжатие. Допустимо применение образцов в виде пластин, т. е. обработанных только с двух сторон, толщиной 40—45 мм. Породы имеющие признаки анизотропии (слоистость, сланцеватость и др.), испытывают в двух направлениях—по слоистости и перпендикулярно к ней. Рекомендуется по двум противоположным сторонам образца делать продольные фаски шириной 3—5 мм к которым будет прикладываться усилие от клиньев или металлических стержней 2.

2. Испытаниям могут подвергаться образцы в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии, для чего они соответствующим образом подготавливаются (см. начало § 9).

3. Подготовленные для испытаний образцы устанавливают в испытательный прибор, который помещают под пресс 4. Образец под направляющим стержнем 3 (соосником) должен располагаться так, чтобы усилие прикладывалось вдоль фасок, т. е. совпадало с направлением образующей. Следовательно, линии контакта породы с линейно сосредоточенной нагрузкой от клиньев или стержней должны располагаться на противоположных сторонах вдоль осевой плоскости.

4. Сжимающую нагрузку непрерывно и плавно увеличивают до тех пор, пока не произойдет разрыв образца. Прочность на растяжение R_p , кгс/см² (МПа), подсчитывают по формуле

$$R_p = (2/\pi) (P_{\max}/F_0) = 0,637 P_{\max}/F_0.$$

Для хрупких пород, какими являются скальные породы и многие полускальные, имеющих коэффициент поперечной деформации $\mu = 0,1 \div 0,25$, с достаточной для практических целей точностью рекомендуется рассчитывать предел прочности на растяжение по формуле

$$R_p = P_{\max}/F_0.$$

Метод скалывания

Когда касательные (тангенциальные) силы превышают внутренние силы сопротивления пород сдвигу, породы начинают разрушаться, наступает потеря их прочности. Скальные и многие разности полускальных пород разрушаются хрупко, потому при действии касательных сил происходит не сдвиг-срез одной части породы по другой, как в мягких и рыхлых породах, а скалывание, т. е. быстрое разрушение с потерей сплошности.

При оценке прочности скальных и полускальных пород определение сопротивления скалыванию очень часто представляет большой интерес. В лабораторных условиях применяют ряд методов для определения прочности пород на скалывание. В 1962 г. совещание группы прочности Международного бюро по механике горных пород (г. Лейпциг) предложило стандартизировать метод, разработанный ВНИМИ. В настоящее время это один из самых распространенных методов.

В основе его лежит использование специального прибора на косой сдвиг. Схема работы его показана на рис. V-34, а общий вид — на рис. V-35. Образец цилиндрической или кубической формы вкладывают в стальные матрицы 3, которым с помощью испытательного пресса задается взаимное перемещение. В матрицах образец 5 закрепляют пластинами 4. В результате

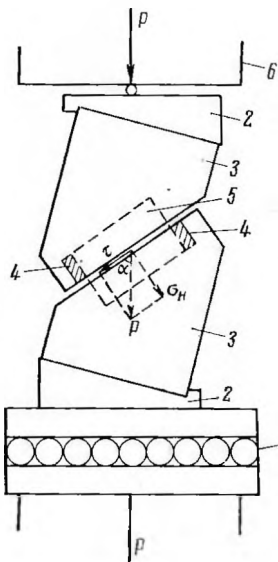


Рис. V-34. Схема работы прибора на косой сдвиг.

образец скалывается по заданной плоскости, наклоненной под углом α , определяемой местом разъема матриц. Наклон этой плоскости может изменяться с помощью набора клиньев 2.

Для крепких горных пород обычно достаточно провести испытания на скалывание под углами 30, 45 и 60°. Для равномерного распределения нагрузки P от пресса по расчетному сечению давление на верхний клин передается через шарик, а под нижним располагается роликовый подшипник 1. Общее усилие P определяется по показаниям нагрузки на прессе или с помощью динамометра, помещаемого между верхним клином 2 и опор-

ным штоком или плитой 6. Если плоскость скалывания площадью F наклонена под углом $\alpha=0^\circ$, напряжение от пресса $\sigma = P/F$ будет равно σ_n . Если эту плоскость приводить в наклонное положение, то напряжение σ_1 раскладывается на нормальное $\sigma_n = \sigma_1 \cos \alpha$ и касательное $\tau = \sigma_1 \sin \alpha$. Касательное напряжение, характеризующее сопротивление пород скалыванию или, точнее, прочность на скалывание $R_{ск}$, достигает обычно максимальной величины при такой ориентировке плоскости скалывания, когда угол α между нормалью к ней и направлением полного напряжения σ_1 равен 45° .

Следовательно, наклон плоскости скалывания к направлению усилия, сообщаемого прессом, определяет величину соотношения нормальных и касательных напряжений при разрушении — скалывании образца. Для полной характеристики прочности породы на скалывание обычно определяют зависимость сопротивления скалыванию от нормальной нагрузки и изображают ее в виде диаграммы, показанной на рис. V-36. Для построения диаграммы производят испытания породы при различных наклонах плоскостей скалывания.

Уравнение прямолинейного участка диаграммы имеет вид

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c.$$

Это уравнение выражает одну из важнейших закономерностей изменения механических свойств горных пород — их прочности. Величины φ и c являются параметрами прочности горных пород: c характеризует наличие и прочность структурных связей, т. е. действие сил сцепления (килограмм-сила на квадрат-

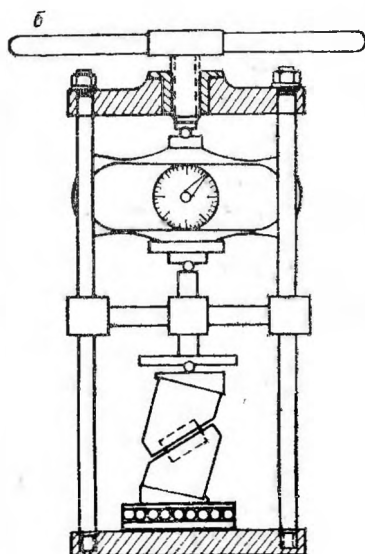
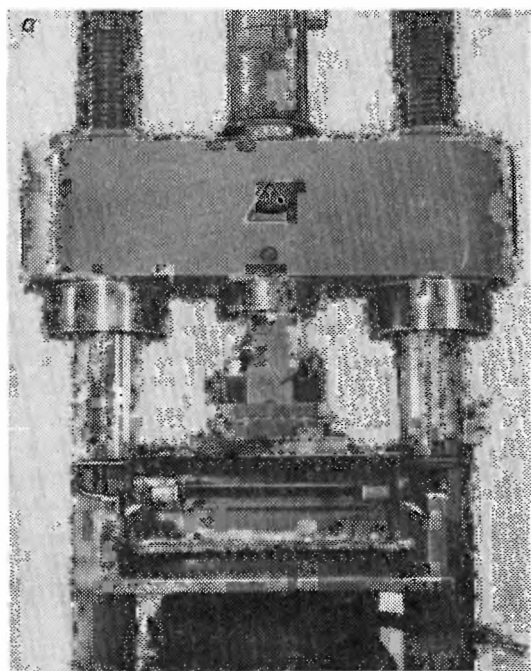
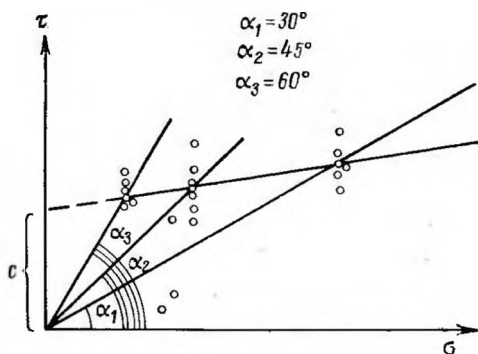


Рис. V-35. Общий вид прибора на косой сдвиг.
а — для прочных пород; б — для более слабых пород.

Рис. V-36. Диаграмма предельного сопротивления сдвигу-скалыванию горных пород.

ный сантиметр или мегапаскаль), а ϕ — интенсивность роста сопротивления сдвигу-скалыванию породы с увеличением нормальной нагрузки.

Для определения прочности пород на скалывание необходимо иметь следующее оборудование: 1) пресс мощностью в зависимости от прочности пород; 2) прибор для испытания пород на косой сдвиг, 3) оборудование для получения петрографической характеристики пород и их физического состояния; 4) журнал определенной формы.



Последовательность определения

1. Для испытаний изготавливают образцы по размеру, форме и физическому состоянию (воздушно-сухие или водонасыщенные) такие же, как и при испытании пород на одноосное сжатие. Они по форме и размерам должны соответствовать матрицам прибора. Породы, имеющие поверхности или зоны ослабления, испытываются в двух направлениях — по направлению таких поверхностей и перпендикулярно к ним.

2. Образец загружают в прибор, который ставят под пресс. Образец должен плотно прилегать к внутренним поверхностям матриц, для чего служат специальные пластины 4 (см. рис. V-34). Зазор между разъемными матрицами при загруженном образце должен быть постоянным, шириной 1—3 мм.

3. Прикладывается и непрерывно плавно увеличивается сжимающая нагрузка до тех пор, пока не произойдет сдвиг-скол образца. Полное разрушающее напряжение σ_1 , кгс/см² (МПа), при этом будет равно

$$\sigma_1 = P/F;$$

сопротивление сдвигу-скалыванию, $R_{ск}$, кгс/см² (МПа), т. е. прочность породы на скалывание, равна

$$R_{ск} = \tau = \sigma_1 \sin \alpha.$$

Испытание повторяют три-пять раз при каждом наклоне плоскости скалывания (заменяя клинья 2 в приборе). По этим данным вычисляют среднее значение $R_{ск}$, а также строят диаграмму предельного сопротивления породы сдвигу-скалыванию* и определяют параметры прочности породы.

§ 10. ПРОЧНОСТЬ ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Метод испытания пород в срезных приборах

Сопротивление сдвигу характеризует прочность песчаных и глинистых пород, т. е. их способность сопротивляться разрушению. Разрушение проявляется в нарушении сплошности породы в результате смещения (сдвига) части породы по одной или нескольким поверхностям скольжения или вдоль зоны скольжения (ослабления). Разрушение породы наступает тогда, когда

* Такие диаграммы иногда неправильно называют паспортом прочности. В техническом отношении это название неграмотное, и пользоваться им не следует.

касательные напряжения превышают внутренние силы сопротивления.

В песчаных и других рыхлых обломочных породах внутренними силами сопротивления сдвигу (разрушению) являются силы трения, возникающие при сдвиге части породы при взаимном перемещении слагающих ее частиц. Так как трение действует внутри породы, его принято называть внутренним трением. В связных (глинистых) породах внутренними силами кроме трения являются также силы сцепления, т. е. силы структурных связей. Сцепление служит количественным выражением прочности структурных связей, действующих в объеме породы по поверхностям скольжения или в пределах зон скольжения.

Максимальное сопротивление пород сдвигу проявляется при гидростатическом равновесии, т. е. когда их влажность и плотность будут соответствовать действующей уплотняющей нагрузке и уплотнение достигнет стабилизации. В связи с этим значения показателей сопротивления пород сдвигу (их прочность) существенно зависят от режима испытаний, и прежде всего от способа подготовки, проведения и условий дренирования пород. В соответствии с этим современная методика лабораторных исследований прочности песчаных и глинистых пород должна учитывать влияние этих факторов и в зависимости от конкретных условий применять ту или иную схему испытаний; главными из этих схем можно назвать следующие.

1. Испытания пород по схеме быстрого сдвига без предварительного уплотнения, при уплотняющих нагрузках, не превышающих структурной прочности пород, природной нагрузки или веса сооружений. В этом случае сдвигающее (разрушающее) усилие передается равномерно и непрерывно в возрастающем порядке до разрушения породы. Результаты испытаний по этой схеме точнее, чем по другим, характеризуют природную прочность пород или прочность в начальный момент воздействия на них нагрузок от сооружений.

2. Испытания пород по схеме медленного сдвига после предварительного полного уплотнения — в условиях завершённой консолидации, при уплотняющих нагрузках, соизмеримых с весом сооружений. В этом случае сдвигающая (разрушающая) нагрузка передается ступенями в возрастающем порядке до разрушения породы. Каждая новая ступень нагрузки прикладывается после завершения деформаций от предыдущей. Данные таких испытаний характеризуют прочность пород при гидростатическом состоянии. Эту схему часто называют «стандартной», она рекомендуется ГОСТ 12248—78.

3. Испытания пород в условиях свободного оттока воды в течение опыта, или, как принято говорить, в условиях открытой системы. При такой схеме обеспечивается полная консолидация породы от каждой ступени нагрузки. Следовательно, эта схема

выполнима только при медленном сдвиге. Данные испытаний при этом удовлетворяют уравнению $\tau = c + f\sigma_n$.

4. Испытания пород в условиях невозможности оттока воды, т. е. в условиях закрытой системы. В этом случае не вся внешняя нагрузка является эффективной, так как часть ее воспринимается поровой водой. Эта схема выполнима при быстром сдвиге или при применении специальных приборов — стабилометров. Результаты опытов при этом будут удовлетворять следующему уравнению: $\tau = c + f(\sigma_n - u)$, где u — поровое давление.

Выбор схемы испытаний пород на сдвиг определяется рядом конкретных условий. При исследованиях песков целесообразно применять главным образом срезные приборы, испытывать их при нагрузках, соответствующих природным или весу сооружений, без предварительного уплотнения, по схеме быстрого сдвига и, естественно, в условиях открытой системы. Испытания следует проводить на образцах естественного сложения либо при плотности, соответствующей естественным условиям залегания пород или определенно заданной.

Выбор схемы испытаний глинистых пород более труден. В этом случае надо учитывать их состав, особенно минеральный, физическое состояние, степень водонасыщенности, склонность к набуханию или к просадкам. Важно знать прочность структурных связей (эффективную нагрузку по компрессионным испытаниям), величину природной нагрузки, которую они испытывали, и предполагаемую нагрузку от сооружений.

Государственным стандартом при проектировании и строительстве всех видов зданий и сооружений рекомендуется схема 2, т. е. медленный сдвиг после полного предварительного уплотнения. В этом случае целесообразно применять главным образом срезные приборы, испытания вести в условиях открытой системы под водой или при естественной влажности пород, при уплотняющих нагрузках, соизмеримых с величиной нагрузок, предполагаемых от веса сооружений, или природных. На стадиях предварительных исследований, когда важно иметь представление о природной прочности пород, целесообразно кроме схемы 2 использовать также схему 1. При проектировании сооружений на слабых водонасыщенных глинистых породах кроме основной схемы изучения сопротивления их сдвигу желательно такие породы исследовать в стабилометрах, в условиях закрытой системы при быстром и медленном темпе разрушения.

Из сказанного следует, что для определения прочности песчаных и глинистых пород по сопротивлению сдвигу одним из основных является метод испытаний их в срезных приборах. Для выполнения таких испытаний необходимо следующее оборудование: 1) прибор для испытания пород на сдвиг; 2) оборудование для определения влажности и плотности пород; 3) часы; 4) журнал определенной формы (см. табл. V-7).

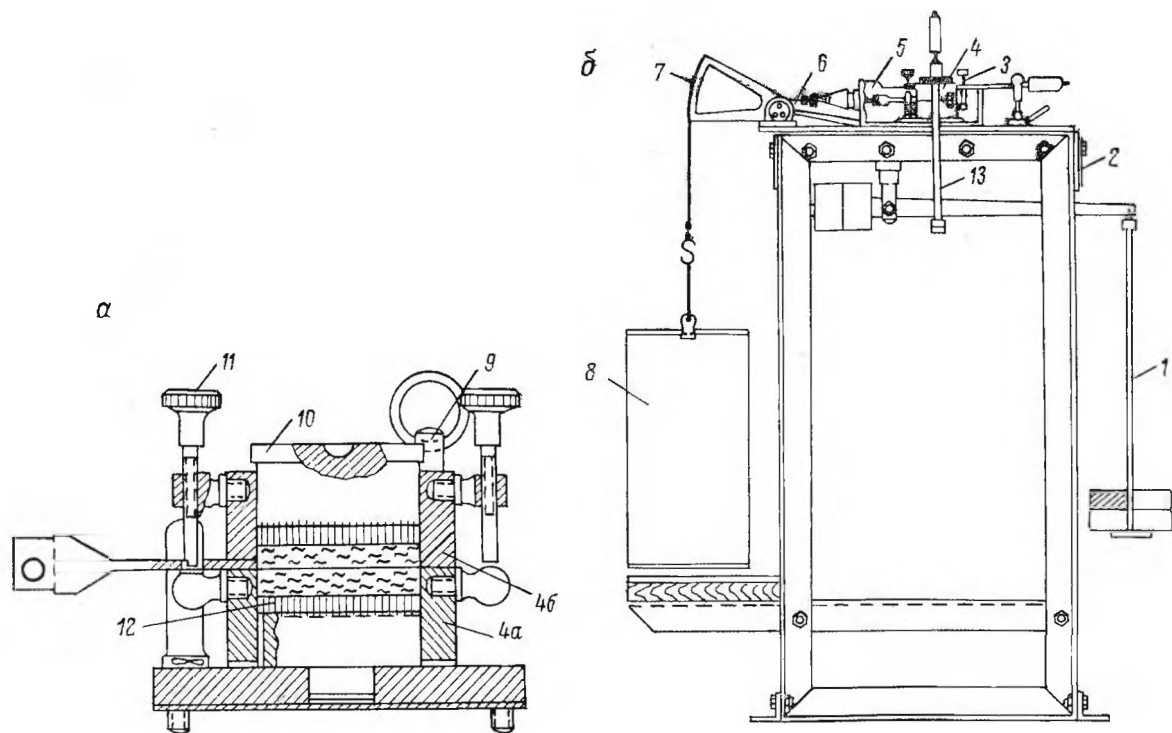


Рис. V-37. Прибор Гидропроекта для испытания пород на сдвиг-срез.

a — рабочая коробка; *б* — общий вид прибора.

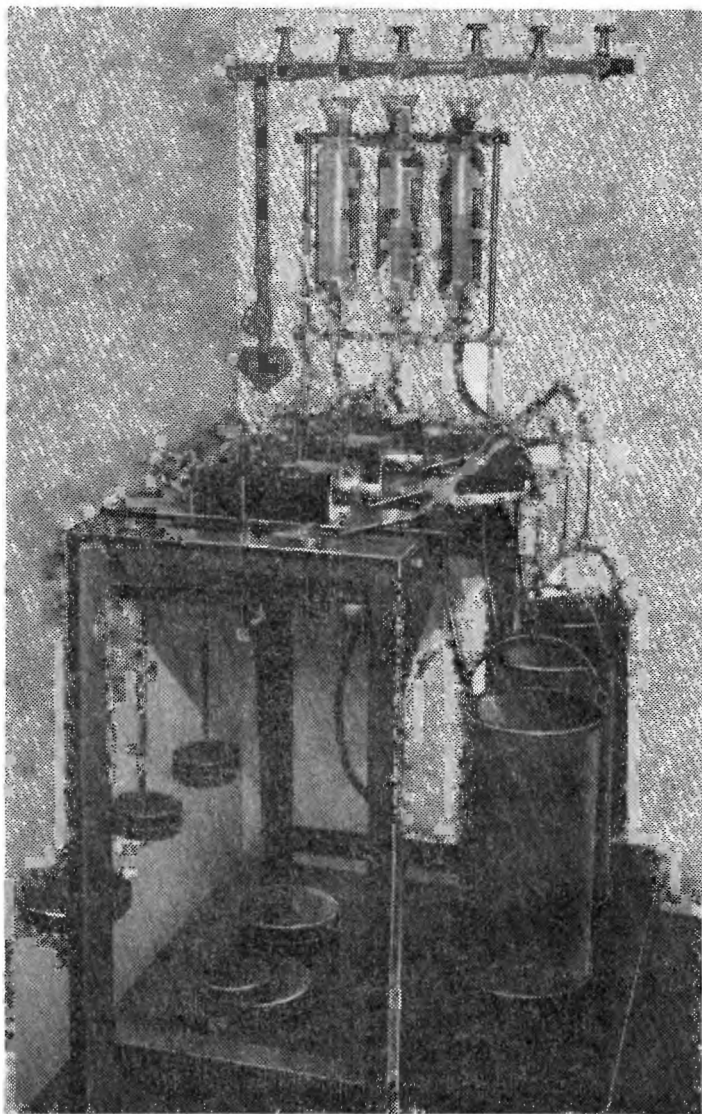


Рис. V-38. Сдвижная установка из трех приборов.

На рис. V-37 показана схема прибора Гидропроекта — одного из распространенных срезных приборов. Он изготавливается экспериментальными мастерскими ЛГИ. Рабочая коробка прибора 4 состоит из двух частей: нижней неподвижной 4а и верхней

подвижной 4б. До опыта обе части коробки скреплены шпильками 9. Смонтирована коробка в специальной ванне 5, установленной на металлической станине 2. Внутренняя полость рабочей коробки имеет форму цилиндра. В этот цилиндр загружают образец испытуемой породы диаметром 50 или 70 мм и высотой 15—20 мм. В основании цилиндра находится пористый камень или металлическая пластина 12 с большим количеством отверстий диаметром 0,5 мм. Нормальное уплотняющее давление на породу передается дырчатым штампом 10, имеющим с верхней стороны углубление для стального шарика, на который опирается серьга 13. На серьгу через специальный рычаг с отношением плеч 1:5 подвешивают подвеску с грузом 1.

Для сдвига в плоскости наименьшего сопротивления обе части коробки 4 с помощью подъемных винтов 11 раздвигаются и создается зазор шириной 1—2 мм. Во избежание выдавливания породы зазор создается перед самым сдвигом. Уплотнение породы производится без зазора. Сдвигающее усилие передается

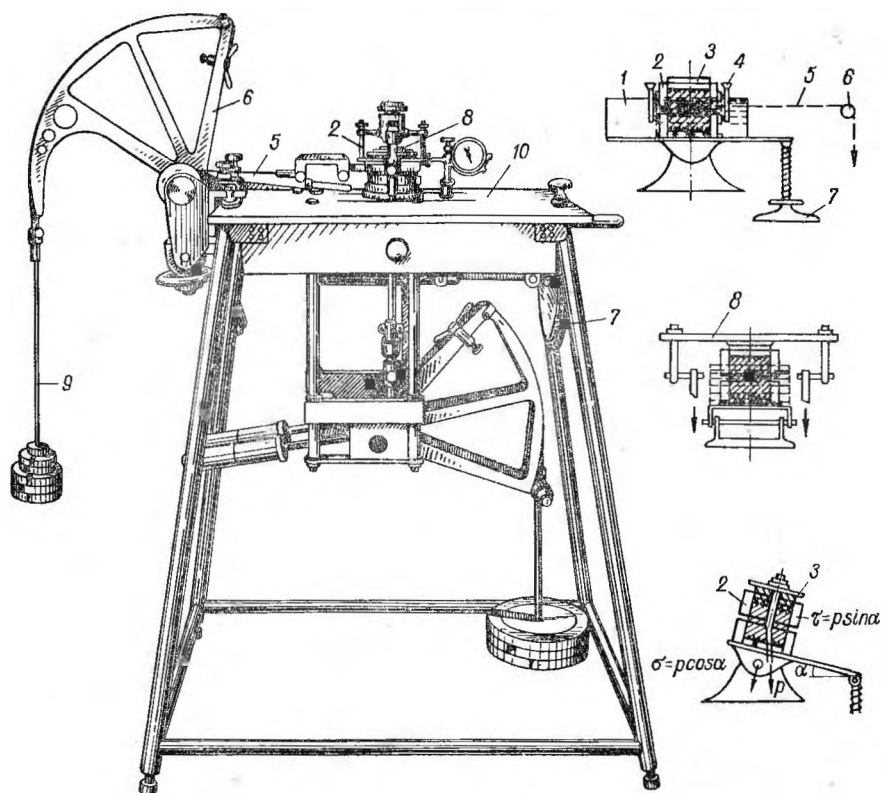


Рис. V-39. Общий вид и схема работы срезного прибора Маслова — Лурье.

с помощью тяги 6, двухступенчатого шкива 7 и загрузочного ведра 8. Регистрация деформаций породы при испытаниях (нормальных и сдвигающих) производится по индикаторам часового типа, закрепленным на кронштейнах 3. При испытаниях породы под водой в ванну 5 заливают воду.

На рис. V-38 показана сдвижная установка, имеющая три прибора. Касательные усилия создаются водой, наливаемой непрерывно или ступенями в загрузочные ведра. Расход воды измеряется делительными воронками.

На рис. V-39 представлены общий вид и схема работы срезного прибора Маслова — Лурье. Прибор применим для испытаний песчаных и глинистых пород естественного и нарушенного сложения. Рабочая коробка прибора 2 устроена так же, как и в приборе Гидропроекта, и состоит из двух частей: верхней подвижной и нижней неподвижной; она помещена в ванну 1. Внутренний диаметр цилиндрической полости коробки равен 7 см. Нормальная нагрузка на образец задается весом гирь, укладываемых на загрузочную подвеску, и передается образцу через штамп 3 и серьгу 8. Сдвигающая сила прикладывается любыми ступенями путем наклона рабочей коробки с образцом породы на некоторый угол посредством штурвала 7.

Угол наклона образца, соответствующий моменту сдвига и отсчитываемый по транспортиру, дает непосредственное значение угла сопротивления сдвигу. Сдвигающая сила в приборе может быть приложена также с помощью тяги 5, двухступенчатого шкива 6 и загрузочной подвески 9. Для создания сдвига по плоскости наименьшего сопротивления обе половины рабочей коробки 2 с помощью специальных подъемных винтов 4 могут раздвигаться и создавать зазор шириной 3—4 мм. Во избежание выдавливания породы в зазор обжатие ее под нагрузкой производится без зазора. Зазор создается непосредственно перед сдвигом. Деформации образца под нагрузкой (нормальной и сдвигающей) регистрируют по индикаторам. Прибор со всеми механизмами для уплотнения породы в рабочей коробке и для осуществления сдвига смонтирован на специальной станине 10.

Прибор Маслова — Лурье обычно сопровождается специальной компрессионной установкой с 12 приборами для предварительного уплотнения глинистых пород перед сдвигом (рис. V-40). В этом случае предполагается уплотнять образцы глинистой породы в специальных рабочих кольцах компрессионных приборов теми или иными ступенями нагрузки; затем кольца с образцами уплотненной породы переставляют в срезной прибор для испытания на сдвиг. Рабочие кольца компрессионных приборов состоят из двух половинок, имеют размер такой же, как и цилиндрическая полость рабочей коробки срезного прибора. Поэтому уплотненный образец можно переносить из прибора для уплотнения в срезной прибор прямо в рабочем кольце.

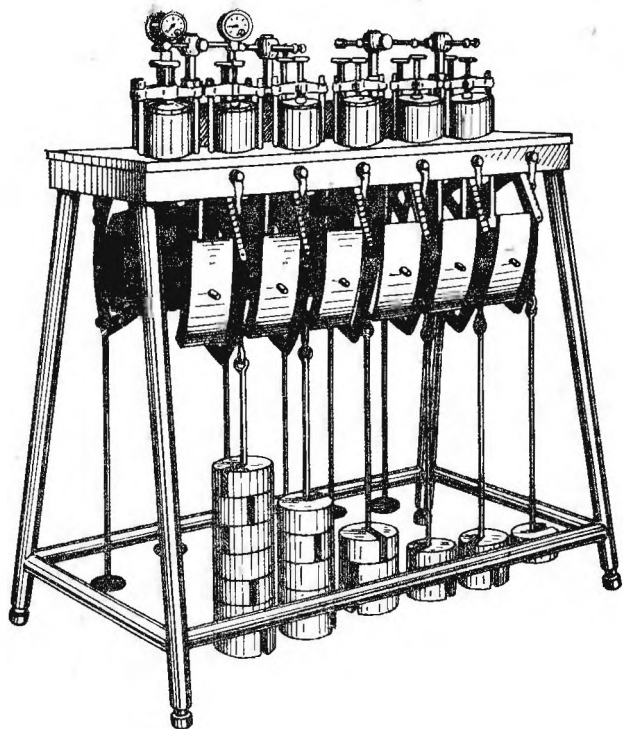


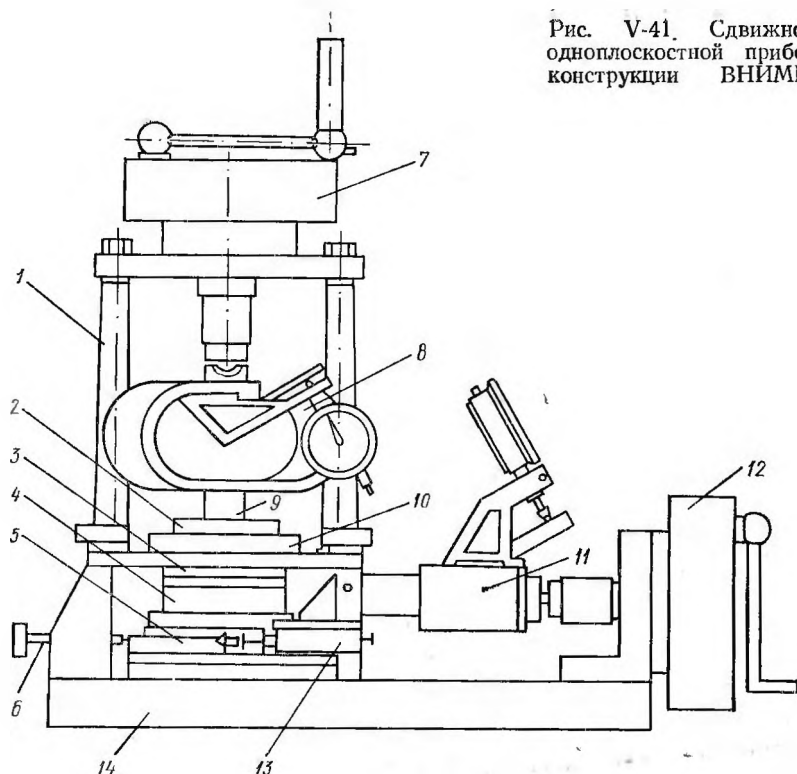
Рис. V-40. Общий вид компрессионной установки для предварительного уплотнения глинистых пород перед сдвигом.

Такой порядок исследований сопротивления сдвигу (определения прочности) глинистых пород при проектировании и строительстве ответственных сооружений недопустим, так как загрузка, разгрузка, перестановка образца и опять загрузка существенно сказываются на результатах испытаний. Поэтому при проектировании ответственных сооружений и на стадиях детальных исследований для любых сооружений уплотнение образцов должно производиться непосредственно в срезных приборах.

На рис. V-41 показан новый тип сдвижного лабораторного одноплоскостного прибора конструкции ВНИМИ. По принципиальной схеме работы этот прибор аналогичен полевым установкам, у которых нормальное уплотняющее и горизонтальное сдвигающее усилие создают домкраты с динамометрами.

У лабораторного прибора на металлической планке — основании 14 установлена опорная рама 1, в пределах которой смонтирована рабочая коробка 3 и два силовых привода с динамометрами, создающими нормальное уплотняющее (7) и горизон-

Рис. V-41. Сдвижной
одноплоскостной прибор
конструкции ВНИМИ.



тальное сдвигающее (12) усилия. Весь прибор расположен и закреплен на металлической станине. Рабочая коробка прибора имеет цилиндрическую полость, в которую погружены верхняя неподвижная втулка 2 с верхним неподвижным срезным кольцом и нижняя подвижная втулка 4 с нижним срезным кольцом. Нижняя втулка закрепляется в подвижной каретке 5, которая может перемещаться на шариках при приложении горизонтальных усилий. Срезные кольца имеют диаметр 70 мм; высота верхнего кольца с одним заточенным краем 25 мм, нижнего 10 мм.

При подготовке прибора к испытаниям втулки 2 и 4 совмещают, перемещая каретку 5 упорным винтом 6. С помощью верхнего срезного кольца вырезают образец горной породы из монолита и вместе с кольцом помещают его во втулку 2. Затем штампом 9 образец продавливают в нижнее срезное кольцо. Таким образом прибор оказывается загруженным горной породой для ее испытания. Перед испытаниями между втулками 2 и 4 и соответственно между краями срезных колец создают необходимый зазор винтовой гайкой 10. Уплотняющее усилие на обра-

зец создают приводом 7 и динамометром 8, а горизонтальное — приводом 12 и динамометром 11. Деформации образца при испытаниях измеряют индикатором 13.

Последовательность определения

1. Доставленный в лабораторию монолит для определения сопротивления сдвигу (прочности) песчаных и глинистых пород естественного сложения и влажности вскрывают и проверяют его сохранность и пригодность для испытаний.

2. Из монолита вырезают образец цилиндрической формы высотой 15—20 мм, диаметром, совпадающим с размером рабочей части прибора. Вырезывание образца выполняют с помощью режущего кольца способом, описанным выше (см. гл. III, § 3). Образец взвешивают и определяют плотность породы. Затем образец из режущего кольца особым поршнем выдавливают в рабочую коробку прибора, предварительно на дно которой на пористый камень или металлическую решетку укладывают лист влажной фильтровальной бумаги. Сверху образец покрывают вторым листом фильтровальной бумаги, устанавливают штамп и прикладывают вертикальную уплотняющую нагрузку. Одновременно с вырезыванием образца берут пробу для определения влажности породы до опыта. После этого остаток монолита немедленно парафинируют.

При испытаниях пород естественного сложения образцы должны загружаться в прибор ориентированными так же, как они залегают в естественных условиях. Породы, имеющие признаки анизотропии (слоистость и др.), желательно испытывать в двух направлениях — по поверхностям ослабления и перпендикулярно к ним.

3. Если из песчаных пород вырезать образцы естественного сложения не представляется возможным, их готовят путем загрузки навески воздушно-сухого песка в рабочую коробку прибора при определенной плотности, соответствующей естественной или заданной. Контролируют плотность уложенной навески $\rho_{ск}$, г/см³:

$$\rho_{ск} = g/V,$$

где g — масса навески породы, загруженной в прибор, г; V — объем породы, загруженной в прибор, см³.

4. Для испытания глинистых пород нарушенного сложения подготавливают образцы так же, как и при испытании их на компрессию (см. § 5).

5. При определении прочности песчаных и глинистых пород по сопротивлению их сдвигу испытания производят при трех уплотняющих нагрузках (например, при 0,5—1—2; 1—2—3; 1—2—4; 1—3—6 кгс/см² или 0,05—0,1—0,2; 0,1—0,2—0,3;

0,1 — 0,2 — 0,4; 0,1 — 0,3 — 0,6 МПа). Для этого опыт на сдвиг повторяют три раза на отдельных образцах породы, вырезанных из одного и того же монолита, или ведут испытания одновременно на трех приборах (сдвижная установка). При изготовлении образцов породы из монолита необходимо следить за их сходством между собой. Желательно испытания на сдвиг при разных вертикальных нагрузках производить на одном и том же приборе.

6. Общие указания относительно выбора размера уплотняющих нагрузок и схемы испытания приведены выше. Эти условия устанавливают до начала опыта в зависимости от физического состояния и свойств породы, стадии исследований, величины природной нагрузки, которую порода испытывала, предполагаемой нагрузки от сооружений и для глинистой породы от прочности ее структурных связей.

7. Произведя загрузку прибора породой и выдержав глинистую породу в соответствии со стандартной схемой испытаний под нагрузкой в течение не менее 15—18 ч, а песчаную не менее 0,5—1 ч для полной консолидации уплотнения, приступают к непосредственному испытанию породы на сдвиг, причем по схеме быстрого сдвига не производят предварительного ее уплотнения. При испытании породы без насыщения водой после загрузки ее в прибор применяют меры по сохранению естественной или заданной влажности породы, для чего вокруг прибора укладывают влажную вату. При испытании пород в водонасыщенном состоянии после приложения уплотняющей нагрузки ванну, в которой расположена рабочая коробка прибора, заливают водой.

8. Испытание породы на сдвиг состоит в определении сдвигающей силы, которую надо приложить, чтобы срезать одну часть породы по другой при данной вертикальной нагрузке. При этом соблюдают следующий порядок. Извлекают шпильки, скрепляющие рабочую коробку, и создают зазор между верхней и нижней ее частями. Для этого завинчивают подъемные винты, которые, опираясь на выступы в нижней части коробки, поднимают верхнюю подвижную ее половину, образуя между ними зазор. Создав зазор необходимой ширины, подъемные винты вывинчивают, нижний конец их должен находиться выше плоскости сдвига. Затем устанавливают в горизонтальное положение индикатор так, чтобы ножка его упиралась в верхнюю часть рабочей коробки, и прикладывают сдвигающую нагрузку. Сдвигающее усилие создается массой воды, которую наливают в загрузочное ведро из тарированной делительной воронки.

9. Сдвигающее усилие прикладывается ступенями по 0,05 от нормальной уплотняющей нагрузки. При этом каждая ступень сдвигающей нагрузки выдерживается до затухания деформации, которое определяется отсутствием приращения деформа-

ции в течение последних трех наблюдений или скоростью деформаций не более 0,01 мм/мин. Наблюдения за деформациями породы производят через каждые две-три минуты по индикатору с точностью до 0,01 мм и записывают в специальный журнал.

Испытание при данной вертикальной нагрузке считается законченным, когда происходит непрерывный сдвиг породы или общая величина деформации превышает 3—4 мм. При испытании пород по схеме быстрого сдвига сдвигающее усилие прикладывают непрерывно (струя воды), плавно, в возрастающем порядке до разрушения — среза образца. Общая продолжительность опыта должна быть не более 2—3 мин.

10. При проведении испытаний на приборе Маслова — Лурье сдвигающее усилие может создаваться также изменением наклона рабочей коробки с образцом породы, находящейся под вертикальной нагрузкой P . Из рис. V-39 видно, что нормальная уплотняющая нагрузка при всяком угле наклона образца породы будет меньше вертикальной нагрузки P , причем разница между ними будет возрастать по мере увеличения угла наклона образца породы. Поэтому чтобы сохранить заданную величину нормальной уплотняющей нагрузки σ_n , при которой намечено произвести сдвиг, необходимо по мере увеличения угла наклона образца увеличивать и вертикальную нагрузку P с тем, чтобы она равнялась величине $\sigma_n F / \cos \alpha$, где F — площадь поперечного сечения образца породы, испытываемой на сдвиг. Для каждого прибора обычно составляют таблицы нагрузок P для разных значений σ_n и углов наклона рабочей коробки прибора. При угле наклона рабочей коробки, при котором произошел сдвиг, сдвигающая нагрузка $\tau = P \sin \alpha$ достигает максимальной величины.

11. На срезном приборе ВНИМИ (см. рис. V-41) испытания можно производить только методом быстрого сдвига. Заполнив срезные кольца образцом горной породы, винтовой гайкой 10 образуют между ними необходимый зазор. Закрепляют индикатор и устанавливают показания его стрелки на нуль. Упорный винт 6 вывертывают, обеспечивая тем самым ход каретки на 15—20 мм. Записав показания динамометров, плавно создают необходимую вертикальную уплотняющую нагрузку на образец породы, контролируя ее по динамометру 8. Под этой нагрузкой образец выдерживают 10—15 мин. Плавно увеличивая горизонтальную сдвигающую нагрузку на образец приводом 12, непрерывно наблюдают за появлением и развитием горизонтальных деформаций образца породы по индикатору 13 и динамометру 11. Усилия начала деформации образца и момент скачкообразного его разрушения — среза записывают в журнал. Это максимальное горизонтальное усилие и характеризует сопротивление горной породы сдвигу при заданной нормальной нагрузке.

12. По окончании испытания породы на сдвиг снимают верти-

кальную нагрузку и из породы в плоскости среза отбирают пробы для определения ее влажности и плотности после опыта при каждой уплотняющей нагрузке. Если опыт шел под водой, то сначала воду из прибора отсасывают резиновой грушей.

13. Обработка результатов испытаний должна включать построение графиков зависимости деформации породы от сдвигающих усилий, построение диаграммы зависимости сопротивления породы сдвигу от нормальной нагрузки, установление параметров, характеризующих прочность пород (коэффициента внутреннего трения и сцепления), проверку правильности полученных результатов испытаний пород на сдвиг.

14. На рис. V-42 показан пример построения графиков развития деформаций под влиянием сдвигающих усилий. На этих графиках видно, что с увеличением нормальной уплотняющей нагрузки от σ_1 до σ_2 увеличивается и сопротивление пород сдвигу. Для каждой нормальной нагрузки σ_1 , σ_2 и σ_3 на графиках отмечаются две характерные точки. Точка *a* отвечает сдвигающим усилиям, создающим первую значительную деформацию породы. Выше этой точки скорость развития деформации заметно увеличивается. Точка *a* на графиках не всегда отчетливо выделяется, но когда выделяется, то может служить контрольной для точки *б*, так как усилие, ей соответствующее, составляет 0,7—0,8 от усилия, соответствующего точке *б*. Точка *б* отвечает предельным максимальным сдвигающим усилиям, при которых наступает непрерывное смещение (деформация) породы по поверхности или вдоль зоны сдвига. Эта точка максимального сдвигающего усилия соответствует стадии разрушения породы. Сдвигающие усилия, отвечающие точкам *б*, принимаются как исходные при построении диаграмм зависимости со-

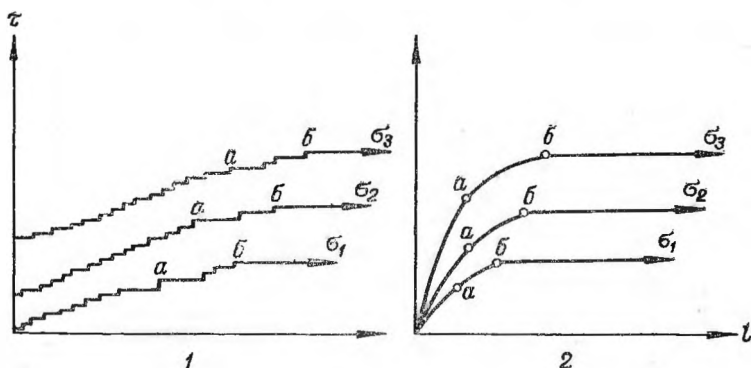


Рис. V-42. Графики развития деформаций под влиянием сдвигающих усилий.

Ход развития деформаций сдвига: 1 — при применении сдвигающих усилий ступенями; 2 — при непрерывном увеличении сдвигающих усилий с заданной скоростью; σ_1 , σ_2 , σ_3 — нормальные уплотняющие нагрузки.

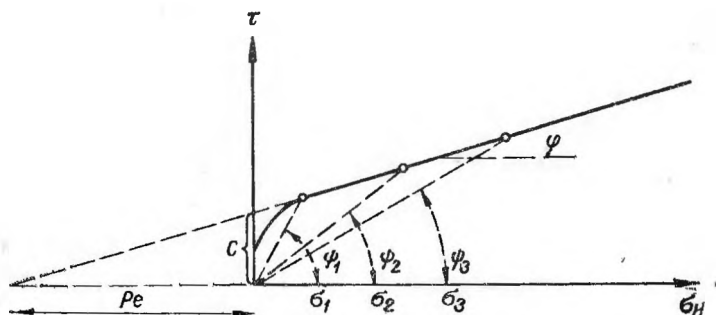
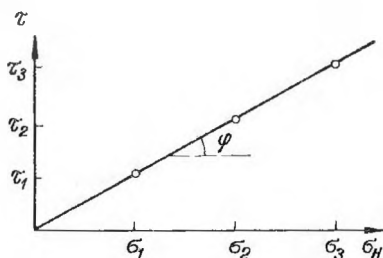


Рис. V-43. Диаграмма сопротивления сдвигу глинистой породы.
 p_e — давление, эквивалентное прочности структурных связей.

Рис. V-44. Диаграмма сопротивления сдвигу песчаных и других рыхлых несвязных пород.



противления пород сдвигу от нормального уплотняющего давления.

15. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от нормальной уплотняющей нагрузки для глинистых пород изображена на рис. V-43, а для песчаных — на рис. V-44. Эта зависимость может быть выражена уравнениями:

для глинистых пород

$$\tau = c + \operatorname{tg} \varphi \sigma_n;$$

для песчаных пород

$$\tau = \operatorname{tg} \varphi \sigma_n,$$

где τ — сдвигающее усилие, кгс/см² (МПа); c — начальный параметр прямой, определяющий часть сопротивления сдвигу, не зависящую от нормального давления, т. е. наличие и прочность структурных связей породы — общее сцепление, кгс/см² (МПа); $\operatorname{tg} \varphi = f$ — коэффициент пропорциональности, угловой коэффициент зависимости сопротивления породы сдвигу от нормального уплотняющего давления, называемый коэффициентом внутреннего трения; σ_n — нормальное уплотняющее давление, кгс/см² (МПа).

Для обломочных несвязных пород уравнение, характеризующее их сопротивление сдвигу, часто имеет вид

$$\tau = c + f\sigma_n.$$

В этом уравнении появляется параметр c , характеризующий начальное сопротивление сдвигу при нормальной нагрузке, не равной нулю. По-видимому, это сопротивление связано не только с трением, но и с явлениями зацепления частиц друг за друга, с затратой сдвигающих усилий на опрокидывание, вращение и перемещение частиц в зоне сдвига [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.].

Параметры вышеприведенных уравнений: угол внутреннего трения φ , коэффициент внутреннего трения f и сцепление (зацепление) c — являются количественными показателями прочности пород. Эти параметры могут быть установлены по диаграммам и вычислены по результатам проведенных испытаний:

$$\operatorname{tg} \varphi = (\tau_2 - \tau_1) / (\sigma_2 - \sigma_1);$$

$$c = \tau_1 - \sigma_1 \operatorname{tg} \varphi = \tau_2 - \sigma_2 \operatorname{tg} \varphi.$$

16. Результаты правильно проведенных испытаний пород на сдвиг должны удовлетворять следующим условиям. При построении диаграммы зависимости сдвигающих усилий от нормальной нагрузки (большей 0,05—0,07 МПа) все полученные точки должны лежать приблизительно на прямой, для неоднородной породы допускается отклонение точек от прямой, не превышающее 5 % от сдвигающего усилия. Прямая диаграммы не должна

Т а б л и ц а V-7. Журнал наблюдений за деформациями горных пород при сдвиге

Лабораторный номер Дата Вертикальная нагрузка кгс/см² (МПа)
 Название породы Номер прибора Влажность породы до опыта %
 Сложение Диаметр образца Влажность породы после опыта %
 Условия опыта Площадь образца Плотность породы г/см³
 Высота образца до опыта

Горизонтальная нагрузка		Время измерения	Деформация образца по индикатору			Примечание
Общая, кгс (Н)	Удельная, кгс/см ² (МПа)		1	2	Средняя	

пересекать ось ординат ниже начала координат. Для песчаных пород эта прямая обычно проходит через начало координат.

17. Все данные наблюдений, полученные в процессе испытаний на сдвиг, записывают в журнал определенной формы (табл. V-7), а окончательный результат — в сводную таблицу (приложение 3).

Метод Н. Н. Маслова

Сопротивление глинистых пород сдвигу в условиях естественной плотности и влажности может оказаться значительно меньшим, чем в условиях полного обжатия под нагрузкой. Поэтому для глинистых пород, особенно их слабых разностей, важно устанавливать сопротивление сдвигу при различной степени уплотнения (консолидации) под нагрузкой, т. е. при различной влажности (рис. V-45). Метод таких испытаний был разработан Н. Н. Масловым, он позволяет устанавливать сопротивление пород сдвигу для любого промежуточного их состояния уплотнения под нагрузкой от сооружения. При этом Н. Н. Маслов рекомендует пользоваться следующим уравнением:

$$\tau_{\sigma W} = c_W + \sigma_{\text{соор}} \operatorname{tg} \varphi_W,$$

где $\tau_{\sigma W}$ — сопротивление глинистой породы сдвигу в зависимости от величины приложенной к ней нагрузки $\sigma_{\text{соор}}$ и достигнутой к данному моменту t влажности W ; c_W — сцепление, зависящее от состояния влажности породы; φ_W — угол внутреннего трения породы при влажности W .

Для начального момента приложения нагрузки на породу сопротивление сдвигу равно

$$\tau_{\text{нач}} = c_{W \text{ нач}} + \sigma_{\text{соор}} \operatorname{tg} \varphi_{W \text{ нач}}.$$

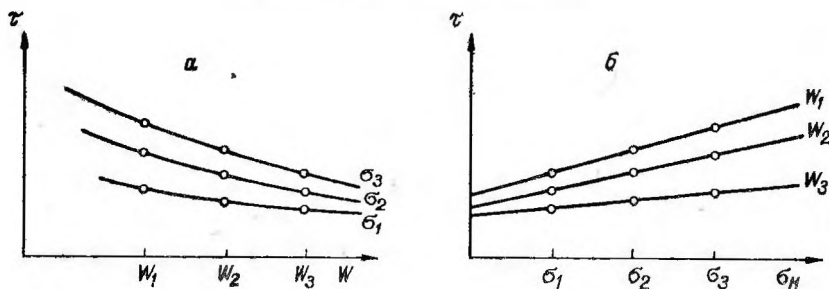


Рис. V-45. Графики, поясняющие испытания глинистых пород на сдвиг по методу Н. Н. Маслова.

а — график изменения сопротивления породы сдвигу при изменении ее влажности; б — зависимость изменения сопротивления породы сдвигу от нормальной нагрузки при данной влажности.

Для конечного момента, т. е. для момента достижения полной стабилизации уплотнения породы от нагрузки $\sigma_{соор}$, сопротивление сдвигу равно

$$\tau_{кон} = \sigma_{w\ кон} + \sigma_{соор} \operatorname{tg} \varphi_{w\ кон}.$$

В любой промежуточный момент величина τ может изменяться от $\tau_{нач} = \tau_{min}$ до $\tau_{кон} = \tau_{max}$ и устанавливается по соответствующим значениям c_w и φ_w , которые определяются экспериментально следующим образом. Три или четыре серии образцов, вырезанных из одного монолита, уплотняют нагрузками $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$ в течение разного времени t (1 мин, 15 мин, 2 ч, 16 ч). В результате каждый образец имеет свою степень консолидации и соответственно влажность W_1, W_2, W_3 и т. д. При этих влажностях (плотностях) производят испытания образцов на сдвиг в срезном приборе, по данным которых затем строят графики, показанные на рис. V-45, и определяют параметры прочности.

Метод А. А. Ничипоровича

По этому методу сопротивление глинистых пород сдвигу определяют при измерении их плотности (пористости), т. е. при состоянии, отвечающем условиям их естественного залегания или искусственно созданным.

Как известно, обратная ветвь компрессионной кривой (кривая разуплотнения) при нагрузках до $0,5\text{—}1 \text{ кгс/см}^2$ ($0,05\text{—}0,1 \text{ МПа}$) имеет малый наклон к оси абсцисс, а это указывает на небольшие изменения плотности породы при разгрузке. Это свойство кривой разуплотнения дает возможность использовать ее для получения образцов породы с практически одинаковой плотностью. Для этого серию образцов уплотняют наибольшей нагрузкой, при которой будет испытываться порода (например, σ_4). После стабилизации уплотнения породы производят испытание на сдвиг в срезном приборе одного образца при максимальной уплотняющей нагрузке, т. е. при σ_4 , а остальных — при меньших, т. е. при $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$. Результаты испытаний изображают в виде обычного графика (рис. V-46), характеризующего сопротивление глинистой породы сдвигу при определенной ее плотности.

Если произвести несколько циклов опытов с одной и той же глинистой породой, но разной степени плотности (уплотненной различными максимальными нагрузками), получим график, изображенный на рис. V-47. Из этого графика видно, что относительная роль трения и сцепления в общем сопротивлении породы сдвигу изменяется при изменении плотности породы. При повышении плотности породы возрастает сцепление и уменьшается величина трения. При уменьшении плотности породы сцепление уменьшается, а относительная роль трения возрастает,

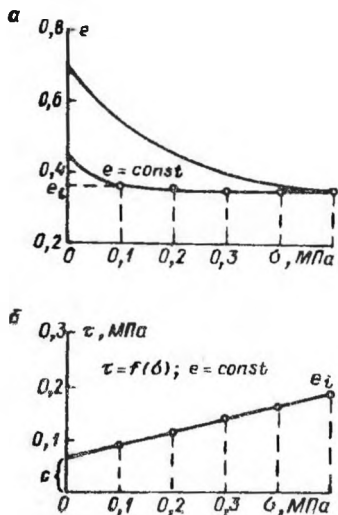


Рис. V-46. Графики, поясняющие испытание глинистых пород на сдвиг по методу А. А. Ничипоровича.

а — компрессионная кривая с обратной ветвью разгрузки (кривая набухания); б — график сопротивления глинистой породе сдвигу при определенной ее плотности.

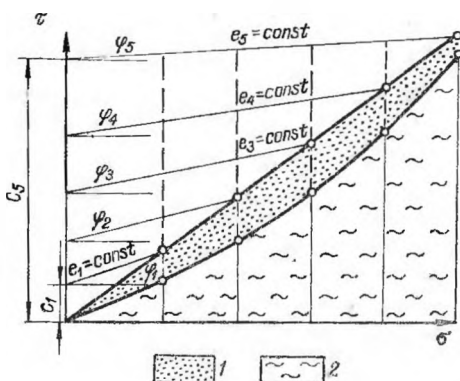


Рис. V-47. График изменения сопротивления глинистой породе сдвигу в зависимости от ее плотности.

1 — часть сопротивления сдвигу, определяемая трением; 2 — часть сопротивления сдвигу, определяемая сцеплением.

§ 11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРИБОРАХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

Горные породы в условиях естественного залегания обычно находятся в сложном объемном напряженном состоянии, развиваемом под влиянием веса вышележащих масс (гравитационных сил) и тектонических сил, в меньшей мере — перепада температурных градиентов и др. При возведении сооружений напряженное состояние горных пород может уменьшаться и увеличиваться за счет перераспределения масс горных пород и воздействия внешних нагрузок. При этом если касательные усилия превысят внутренние силы сопротивления пород сдвигу, породы начинают разрушаться, наступает потеря их прочности.

При изучении прочности горных пород, т. е. сопротивления их разрушению, важно испытания пород производить в условиях силовых воздействий, аналогичных или близких к природным. Этим условиям в известной мере удовлетворяет метод испытания пород в приборах трехосного сжатия, называемых стабилометрами*. Испытания пород на трехосное сжатие правильнее

* Измеритель прочности, stability — прочность, устойчивость.

моделируют их напряженное состояние в естественных условиях залегания и дают достаточно надежные данные о сопротивлении сдвигу, но они более сложны, чем испытания в срезных приборах. Поэтому они не могут быть массовыми в условиях производственных исследований.

В стабилометрах образец породы цилиндрической формы в тонкой резиновой оболочке помещают в камеру прибора между верхним и нижним штампами (рис. V-48). Всестороннее (в стабилометрах типа А) или только боковое (в стабилометрах типа Б) давление на образец передается при помощи воды, глицерина или другой жидкости, нагнетаемой в камеру. В стабилометрах типа А помимо всестороннего давления (равного боковому) через шток при помощи пресса на образец передается осевое давление $\sigma_1 = \sigma_2 + P$ (рис. V-49, а). Следовательно, в таких стабилометрах осевое давление не может быть меньше бокового. В стабилометрах типа Б, в отличие от типа А, боковое давление не является одновременно и всесторонним. Осевое давление на образец σ_1 здесь передается непосредственно через поршень независимо от бокового $\sigma_2 = \sigma_3$ и, в частности, может быть меньше бокового (рис. V-49, б).

Если в стабилометрах всестороннее или боковое давление поддерживать постоянным, а осевое постепенно увеличивать, то образец породы можно довести до разрушения. Этого же можно достичь, если осевое давление сохранять постоянным, а всестороннее уменьшать. Зависимость относительных осевых деформаций от добавочных напряжений (девиатор напряжений) $P = \sigma_1 - \sigma_2$ будет иметь вид, показанный на рис. V-49, в.

По данным испытаний одного образца песчаных пород и двух-трех образцов глинистых пород при различных значениях всестороннего или бокового давления строят диаграммы Мора (рис. V-50 и V-51). Касательные к предельным кругам напряжений на этих диаграммах удовлетворяют уравнениям $\tau = \text{tg } \varphi \sigma_n$ и $\tau = c + \text{tg } \varphi \sigma_n$. Параметры этих уравнений φ , $\text{tg } \varphi = f$ и c являются количественными показателями прочности пород.

Испытаниям в приборах трехосного сжатия для определения прочности могут подвергаться скальные, полускальные, песчаные и другие несвязные и глинистые породы. Особенно целесообразно применять такие испытания для пород слабых глинистых, мягких водонасыщенных, неустойчивой консистенции, так как испытывать такие породы в срезных приборах затруднительно — они легко раздавливаются и выдавливаются в зазоры прибора.

В зависимости от прочности пород применяют различные стабилометры, позволяющие производить испытания пород при различных, и в частности боковых, давлениях. Н. Н. Сидоров рекомендовал стабилометры классифицировать в зависимости от развиваемого в них бокового давления на следующие группы:

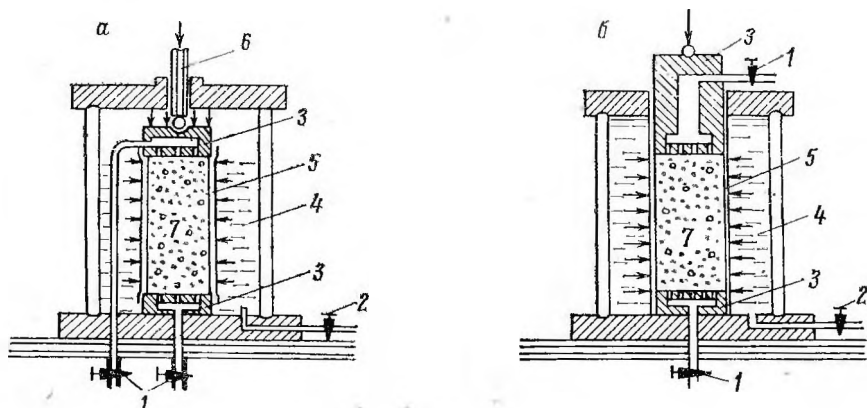


Рис. V-48. Схема конструкций стабилометров.

a — типа А; *б* — типа Б.

1, 2 — краны; 3 — верхний и нижний поршни; 4 — камера; 5 — резиновая оболочка; 6 — шток; 7 — образец.

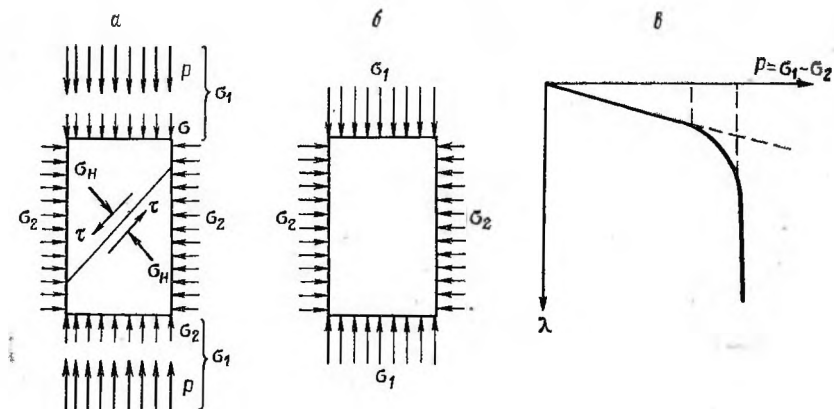


Рис. V-49. Схема испытаний пород на трехосное сжатие.

a — передача напряжений на породу в стабилометрах типа А; *б* — то же, в стабилометрах типа Б; *в* — график развития деформаций.

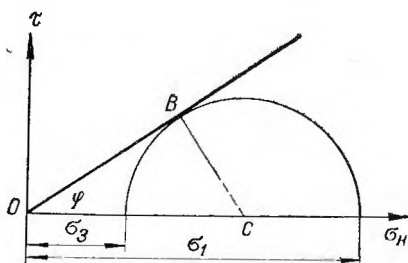


Рис. V-50. Диаграмма предельного напряжения сдвига песчаной породы.

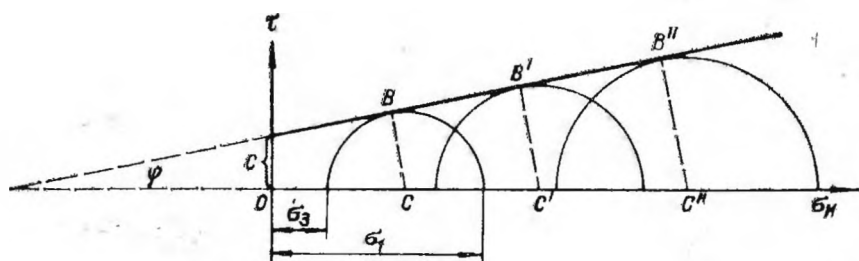


Рис. V-51. Диаграмма предельного напряжения сдвига глинистой породы.

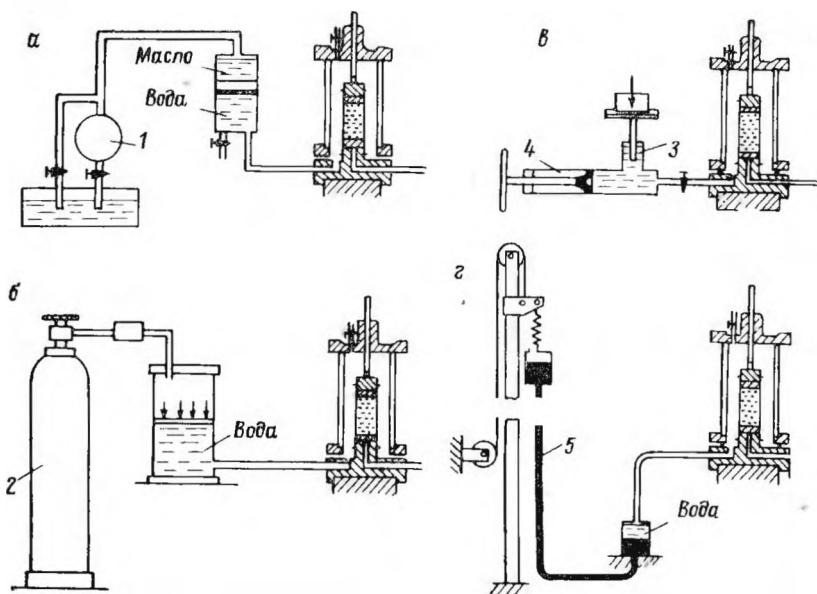


Рис. V-52. Схема систем передачи бокового давления в стабилометрах.
а — нагнетанием масла насосом (1); б — давлением сжатого воздуха через редуктор, установленный на баллоне (2); в — системой плавающего поршня (3) с компенсатором (4); г — давлением ртутного столба (5).

- 1) стабилометры для испытания пород при боковых давлениях до 6 кгс/см^2 ($0,6 \text{ МПа}$) (среднее боковое давление);
- 2) стабилометры для испытания пород при боковых давлениях до 60 кгс/см^2 (6 МПа) (высокое боковое давление);
- 3) стабилометры для испытания пород при боковых давлениях более 60 кгс/см^2 (6 МПа) (сверхвысокое боковое давление).

Таким образом, для определения прочности горных пород в приборах трехосного сжатия необходимо иметь следующее

оборудование: 1) стабилومتر мощностью, соответствующей прочности пород; 2) оборудование для определения плотности и влажности пород; 3) часы-секундомер; 4) журнал определенной формы (см. табл. V-8).

В настоящее время известно сравнительно много конструкций стабилометров, различающихся особенностями создаваемых давлений (типы А и Б), мощностью, т. е. величиной возможных осевых и боковых давлений, размерами испытываемых образцов и соответственно размерами прибора, способом подачи бокового давления (рис. V-52) и другими признаками. В данном учебном пособии приводится описание только некоторых приборов, наиболее известных и распространенных в лабораториях СССР.

На рис. V-53 показан стабилومتر ЛИИЖТ* конструкции Н. Н. Сидорова. Он принадлежит к приборам типа А. Камера стабилометра 4 смонтирована на станине 1, на которой укреплен рычажный пресс 21, с помощью которого через рамку 2 создается осевое давление на шток прибора 12. При подготовке камеры к испытаниям рамку 2 подвешивают на кронштейне 3 с противовесом 22. Образец породы 10 в резиновой оболочке помещают в камере 4 между верхним подвижным поршнем 11 и нижним неподвижным 9, составляющим одно целое с основанием камеры 7. Концы резиновой оболочки закрепляются на поршнях с помощью специальных прижимных колец. Торцы поршней, прилегающие к образцу, свободно пропускают воздух и воду во внутренние их полости, соединенные трубками со штуцерами 5 и 6. Это позволяет насыщать породу водой и обеспечивает свободный отвод воды, отжимаемой из образца при испытаниях по открытой схеме.

Камера стабилометра, изготовленная из органического стекла, представляет собой стакан, которым накрыт образец. Между стенками стакана и основанием камеры проложена резиновая прокладка 8. Для герметизации стакан плотно прижимается к основанию тягами 13, идущими к валу с рукояткой 16, укрепленному на станине. Всестороннее давление на образец создается по способу плавающего поршня. Плавающий поршень 14 (с площадкой для груза 15 и маховиком для его вращения 17) в притертой гильзе объединен в один узел с цилиндром компенсатора 20. Осевое давление на образец передается от штока 12 на верхний поршень 11. Заполнение прибора водой производится через штуцер 19, соединяемый шлангом с бутылкой. Для этого открывают кран 18, извлекают из камеры шток 12, бутылку поднимают выше прибора, и вода самотеком заполняет камеру и цилиндр компенсатора (винт компенсатора опускают

* Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта.

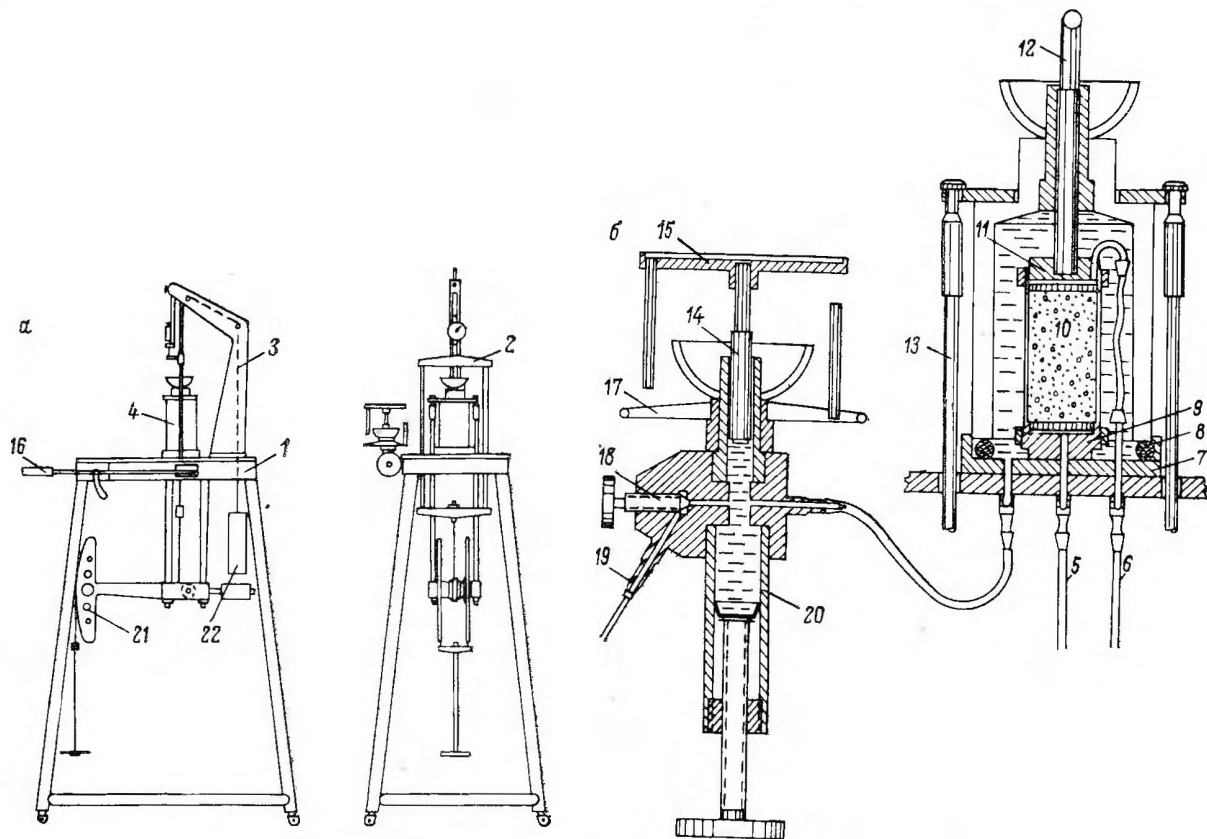


Рис. V-53. Схема стабилометра ЛИИЖТ конструкции Н. Н. Сидорова.
 а — общий вид; б — устройство камеры.

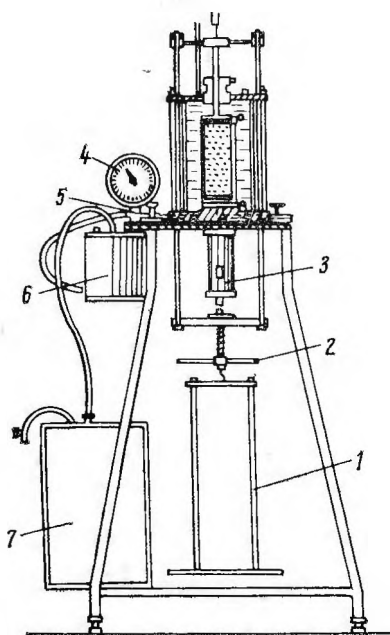


Рис. V-54. Схема стабилометра ДИИЖТ.

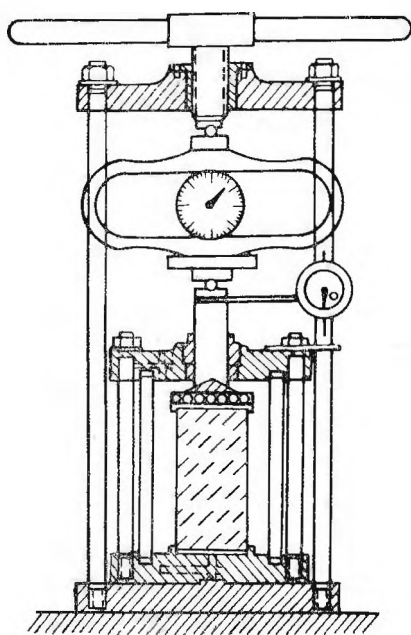


Рис. V-55. Стабилометр с винтовым прессом конструкции ВНИМИ.

в крайнее нижнее положение). После заполнения камеры водой кран 18 закрывают и шток 12 вставляют в стакан.

Прибор предназначен для испытания всех видов песчаных и глинистых пород при боковом давлении до 6 кгс/см^2 ($0,6 \text{ МПа}$) и осевом до 50 кгс/см^2 (5 МПа). Размеры образца: диаметр 4 см, высота 6 см.

На рис. V-54 показан стабилометр ДИИЖТ*, конструкция которого разработана под руководством М. Н. Гольдштейна. Он также принадлежит к приборам типа А. В этом приборе испытывают образцы песчаных и глинистых пород диаметром 62 мм и высотой 150 мм при боковом давлении до 10 кгс/см^2 (1 МПа) и осевом до 20 кгс/см^2 (2 МПа). Осевая нагрузка от подвески с грузом 1 передается через шток прибора на верхний подвижный поршень. Она может создаваться также при помощи винта подвески 2. В этом случае усилие винта измеряется пружинным динамометром 3. Всестороннее давление в рабочей камере прибора создается следующим образом. От баллона со

* Днепропетровский институт инженеров железнодорожного транспорта.

сжатым воздухом через редуктор, установленный на баллоне, воздух с необходимым давлением подается в воздушный бачок 7, соединенный с жидкостным бачком 6, три четверти которого заполнено глицерином. Из бачка глицерин через кран 5 под нужным давлением, измеряемым манометром 4, подается в рабочую камеру прибора. Наличие воздушного бачка дает возможность длительное время сохранять давление в приборе постоянным.

Наиболее простым и удобным для массовых испытаний прибором типа А является стабилметр конструкции ВНИМИ (рис. V-55). Испытания в этом приборе могут производиться при всестороннем давлении до 30 кгс/см^2 (3 МПа) образцов различных песчаных и глинистых пород диаметром 54 мм и высотой 108 мм. Осевое давление здесь создается винтовым прессом и передается через шток на верхний подвижный поршень, измеряется динамометром. Боковое давление осуществляется водой, нагнетаемой в камеру прибора специальным ручным насосом, и измеряется манометром, установленным на насосе.

Широкой известностью пользуется стабилметр марки М-2 конструкции Е. И. Медкова. Это прибор типа Б. Общий вид его показан на рис. V-56, а устройство рабочей камеры — на рис. V-57. Прибор предназначен для испытания образцов различных глинистых и песчаных пород диаметром 5,5 см и высотой 11 см при осевом давлении до 20 кгс/см^2 (2 МПа) и боковом до $8\text{—}10 \text{ кгс/см}^2$ (0,8—1,0 МПа).

Образец породы 4 в тонкой резиновой оболочке помещают в рабочую камеру прибора между верхним подвижным поршнем 7 и нижним неподвижным 1, составляющим одно целое с основанием камеры 11. Корпус камеры состоит из прозрачного стакана 3, изготовленного из органического стекла, закрепленного между верхним и нижним фланцами 5 и 2. Заполнение камеры водой производится ее закачиванием насосом через наполнительный клапан 6, вмонтированный в верхний фланец корпуса. Опорожнение камеры осуществляется через спусковую трубку 13, вмонтированную в нижний фланец корпуса прибора. Насыщение образца водой, а также отвод воды, отжимаемой из образца в процессе опыта, производится через тройник 14, вмонтированный в основание прибора 11, и водоприемную трубу 15. Спуск воды от образца производится через выпуск 12. Фиксация высоты образца, находящегося в камере прибора, осуществляется двумя винтами-арретирами 16.

Осевая нагрузка на образец передается поршнем 7, плотно охватываемым в нижней части резиновой оболочкой. Вертикальные деформации образца измеряются индикаторами 8, закрепленными на поршне 7. Боковое давление в камере прибора измеряется манометром 17 с точностью до $0,1 \text{ кгс/см}^2$ (0,01 МПа). Во избежание бокового расширения образца за счет сжа-

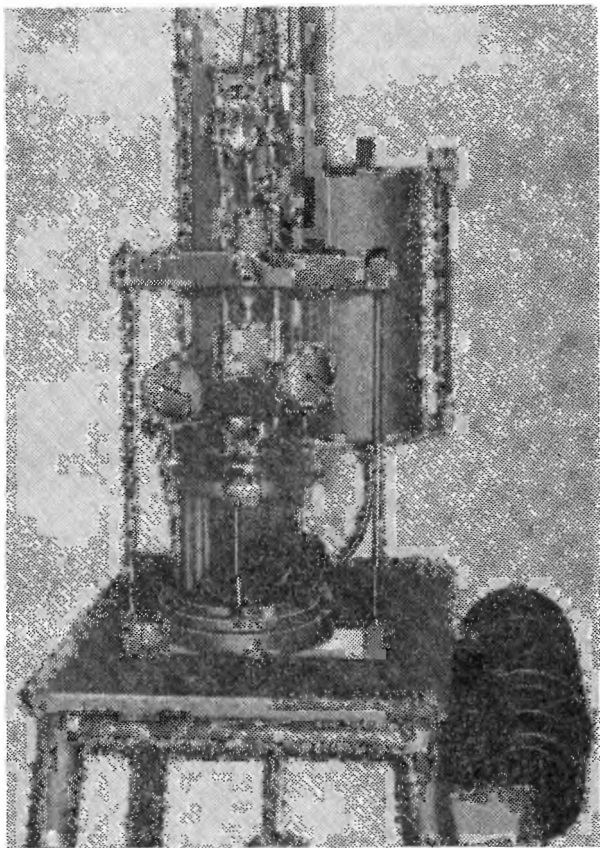


Рис. V-56. Общий вид стабилометра конструкции Е. И. Медкова.

тия воздуха в полую пружине манометра при испытаниях соответствующую полость предварительно (перед постановкой манометра) заполняют водой. Снижение давления в камере осуществляется выпуском из нее воды при помощи пружинного регулятора 9, смонтированного на верхнем фланце корпуса. Этот регулятор автоматически поддерживает заданное давление в рабочей камере в процессе испытания образца породы. Настройка регулятора осуществляется различным сжатием пружины регулирующей гайкой. В таком случае боковое расширение образца измеряется по объему вытесненной воды из камеры, поступающей через пружинный регулятор 9 в волюмометр 10, представляющий собой стеклянную трубку, на которой нанесена шкала (в миллиметрах).

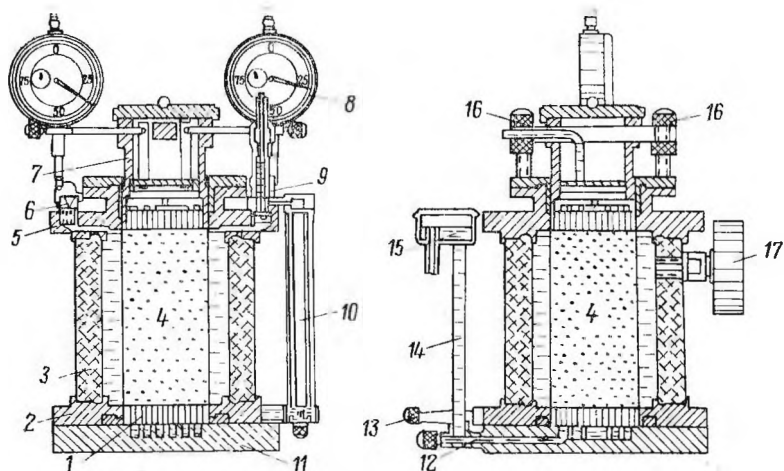


Рис. V-57. Устройство рабочей камеры стабилометра Е. И. Медкова.

Осевая нагрузка на поршень 7 передается через подвеску от рычажного пресса, смонтированного на станине. Отношение плеч пресса 1:12. Нагрузка на пресс может задаваться ступенями или непрерывно. В первом случае нагрузка осуществляется гири, укладываемыми на подвеску, или водой, подаваемой в загрузочное ведро из бачка, подвешенного на станине. Для измерения количества воды, поступающей в ведро, бачок снабжен водомерным стеклом.

Такое устройство имеют некоторые модели стабилометров типов А и Б, рассчитанных на испытание образцов пород при средних и высоких напряжениях. При решении некоторых специальных задач применяют стабилометры, позволяющие производить испытания образцов пород при сверхвысоких боковых или всесторонних напряжениях. Описание таких приборов в настоящем руководстве не приводится.

Последовательность определения

1. Определение прочности горных пород в приборах трехосного сжатия начинается с подготовки образцов цилиндрической формы, диаметр и высота которых зависят от габаритов приемяемого прибора. В стабилометрах, описание которых приведено выше (ЛИИЖТ, ДИИЖТ, ВНИМИ, Е. И. Медкова), образцы должны быть диаметром от 4 до 6,2 см и высотой от 6 до 15 см. В большинстве существующих стабилометров применяют образцы диаметром 3,5—5 см и высотой, равной 1,5—2 диаметрам образца.

Образец из глинистой породы вырезают из монолита режущим цилиндром, как режущим кольцом, способом, описанным выше (см. гл. 3, § 3). Внутренний диаметр и высота цилиндра в точности соответствуют необходимым размерам образца. Монолит, из которого вырезают образец, не должен иметь следов нарушения естественного сложения и влажности. Поэтому вскрывая монолит, проверяют его сохранность и пригодность для испытания. Из пород глинистых уплотненных и полускальных образец необходимых размеров удобно вырезать буровой коронкой на сверлильном или буровом станке.

Вырезав образец, его устанавливают в рабочей камере прибора в следующем порядке. На нижний неподвижный поршень прибора, покрыв его кружком влажной фильтровальной бумаги, натягивают и закрепляют край резиновой оболочки. Устанавливают на поршень цилиндр с образцом, который затем плавно выжимают из цилиндра деревянным пестиком. Одновременно с этим на образец натягивают или накатывают резиновую оболочку. На верхний торец образца укладывают второй лист влажной фильтровальной бумаги и устанавливают верхний подвижный поршень прибора, на котором закрепляют резиновую оболочку.

2. При испытаниях песков образец формируют следующим образом. Резиновую оболочку натягивают на нижний неподвижный поршень прибора и закрепляют. Предварительно на поршень укладывают лист влажной фильтровальной бумаги. Оставшуюся часть резиновой оболочки пропускают внутрь специального зарядного цилиндра, устанавливаемого на основание прибора, и натягивают по внутренней поверхности цилиндра. Последний имеет с боков два отверстия со штуцерами, на которые надевают резиновые трубки, соединенные тройником. Через тройник откачивают воздух, и оболочка плотно прилегает к стенкам цилиндра, размер которого соответствует необходимому размеру образца. Такие зарядные цилиндры полезно применять и при испытаниях мягких глинистых пород, когда есть опасность деформирования образца при натягивании на него резиновой оболочки. Затем навеску воздушно-сухого песка загружают в цилиндр с трамбованием до необходимой плотности. Зная массу навески песка, загруженного в цилиндр, и его объем, устанавливают плотность песка.

Испытание песков производят при плотности, соответствующей естественной или заданной. Верхний торец сформированного образца выравнивают, накрывают листком влажной фильтровальной бумаги, устанавливают верхний поршень прибора, натягивают на него верхний край резиновой оболочки и ее закрепляют. После этого грузочный цилиндр снимают.

3. Для каждого образца или серии образцов, по которым определяют прочность пород, составляют полную характеристику

их петрографических особенностей и физического состояния, т. е. плотности, пористости, влажности и др. Для этого из той же части монолита, из которой вырезан образец, отбирают соответствующие пробы.

4. Изготовив образец, собирают рабочую камеру, устанавливают ее на станину и подготавливают для проведения испытаний. Рабочая камера должна быть собрана очень тщательно, чтобы не было утечки воды (или другой применяемой жидкости) и снижения всестороннего или бокового давления во время испытания. Затем камеру полностью наполняют водой. Для того чтобы все эти операции выполнять правильно, необходимо детально ознакомиться с устройством прибора, на котором будет исследоваться прочность породы.

5. При испытаниях пород при естественной или заданной влажности принимают меры для предупреждения подсыхания образцов, особенно при их подготовке. При испытаниях пород в водонасыщенном состоянии к образцу в резиновой оболочке, помещенному в рабочую камеру, подводят воду для насыщения. Для этого открывают соответствующие краны прибора. Предварительно, если испытывается глинистая порода, закрепляются арретирные устройства и образец погружается всесторонним давлением для предупреждения набухания. Для полного насыщения глинистой породы ее выдерживают до 5 сут. Песчаные породы целесообразно испытывать только в водонасыщенном состоянии, насыщение их завершается обычно в течение 1—2 ч.

6. Схема испытаний и размер нагрузок, при которых определяется прочность пород, устанавливаются до начала опыта (см. § 10). Как правило, испытания должны проводиться на трех образцах при различных значениях всестороннего или бокового давления, например при 0,05, 0,1, 0,2; 0,1, 0,2, 0,3; 0,1, 0,2, 0,4; 0,1, 0,3, 0,6 МПа. Породы полускальные испытывают при нагрузках, измеряемых десятками долями и единицами мегапаскалей.

7. При стандартной схеме испытаний, т. е. схеме медленного разрушения породы, после предварительного полного ее уплотнения в условиях свободного оттока воды (открытая система) соблюдается следующий порядок. Образец уплотняют первой ступенью всестороннего давления при открытых кранах прибора для свободного оттока ожимаемой из образца воды до полной консолидации. В приборах типа Б всестороннее давление создается боковым давлением и равным ему осевым. Наблюдения за консолидацией уплотнения ведут по индикатору, закрепленному на приборе. Для полной консолидации уплотнения глинистой породы ее выдерживают под нагрузкой обычно не менее 15—18 ч, а песок — не менее 0,5—1 ч. Затем, поддерживая заданное давление постоянным, наблюдая за показаниями манометра, начинают прикладывать осевое давление ступенями в возрастающем порядке до разрушения образца.

Размер ступени осевой нагрузки устанавливается в зависимости от прочности пород. Для слабых пород ступень осевой нагрузки принимается равной 0,05—0,1 от всестороннего или бокового давления и равной 0,2—0,5 для уплотненных пород. Каждая новая ступень осевой нагрузки прикладывается после завершения деформаций от предыдущей ступени. Наблюдения за осевыми деформациями ведут через 1—2 мин. Разрушение образца фиксируется по резкому увеличению и непрерывному росту деформации при постоянной нагрузке, а также визуально через прозрачные стенки рабочей камеры.

Плотные породы обычно разрушаются в результате сдвига одной части образца относительно другой по плоскости, наклонной и вертикальной к оси образца. Породы слабые, мало уплотненные при разрушении расплющиваются, приобретают боченкообразный вид. В этом случае за условный предел прочности можно принимать напряжение, при котором осевая деформация достигнет 10—15 % первоначальной высоты образца. После разрушения образца прибор разбирают и отбирают пробу для определения влажности породы после опыта. Затем опыт повторяют со вторым и третьим образцами при других значениях всестороннего или бокового давления.

8. Испытания по схеме быстрого сдвига без предварительного уплотнения в условиях невозможности оттока воды (закрытая система) отличаются от стандартной схемы следующим.

Таблица V-8. Журнал наблюдений за деформацией горных пород при испытании на трехосное сжатие

Лабораторный номер	Дата	Влажность до опыта .%
Название	Номер прибора	Влажность после опыта .%
Сложение	Диаметр образца	Плотность до опыта . . .
Условия опыта	Площадь образца	.г/см ³
	Высота образца	

Время наблюдений		Боковое давление		Осевое давление		Деформация образца				Примечание
ч	мин	Общее, кг (Н)	Удельное, кгс/см ² (МПа)	Общее, кгс (Н)	Удельное, кгс/см ² (МПа)	Горизонтальная		Вертикальная		
						1	2	1	2	

Подготовив прибор к испытаниям, прикладывают первую ступень всестороннего давления на образец при закрытых кранах прибора, т. е. создают условия невозможности отжатия воды из породы. Непосредственно после обжатия образца породы всесторонним давлением прикладывают дополнительное осевое давление непрерывно, равномерно в возрастающем порядке до его разрушения. Испытания повторяют еще два раза с другими образцами при более высоких значениях всестороннего давления. В каждом случае определяют влажность породы после опыта.

9. Обработка результатов определения прочности горных пород в приборах трехосного сжатия включает: 1) построение графиков развития деформаций от добавочных напряжений $P = \sigma_1 - \sigma_2$ (см. рис. V-49, в); 2) построение диаграмм предельного напряжения сдвига пород (см. рис. V-50 и V-51); 3) установление параметров прочности пород — угла и коэффициента внутреннего трения и величины сцепления.

10. Все данные наблюдений при испытаниях записывают в журнал определенной формы (табл. V-8), а окончательные результаты — в сводную таблицу (приложение 3).

§ 12. УСЛОВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Метод пенетрации. Пенетрацией называется метод определения сопротивления песчаных и глинистых пород проникновению в них наконечников определенной формы и размеров. Если глубина погружения наконечника не превышает его высоты, метод называют пенетрацией, а если превышает — зондированием.

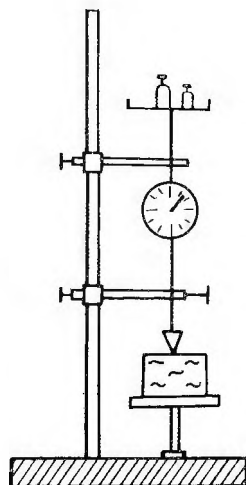
Метод пенетрации теоретически хорошо обоснован решением задачи предельного равновесия горных пород под штампом и коническим наконечником. Установлено, что различным состояниям песчаных и глинистых пород соответствуют определенные величины предельной прочности, выявляемые методом пенетрации. Поэтому этот метод широко используется для сравнительной оценки состояния и прочности пород, для выявления ослабленных зон, горизонтов, прослоек, участков пород в геологическом разрезе. При этом для характеристики результатов пенетрационных испытаний П. А. Ребиндер предложил применять величину пластической прочности P_m , кгс/см² или МПа (условное предельное сопротивление сдвигу), а В. Ф. Разоренов — величину удельного сопротивления пенетрации $R_{пн}$ (кгс/см² или МПа) и коэффициент пенетрации N , т. е. относительное удельное сопротивление пенетрации (применим для глинистых пород):

$$P_m = K_a P / h^2;$$

$$R_{пн} = P / h^2; \quad N = R_{пн} / R_{т. пн},$$

где K_a — константа конического наконечника (если угол при вер-

Рис. V-58. Схема прибора для пенетрационных испытаний.



шине конуса $\alpha=30^\circ$, то $K_a=0,959$); P — усилие пенетрации, кгс (Н); h — глубина погружения конического наконечника под влиянием усилия P ; $R_{т.пл}$ — удельное сопротивление пенетрации глинистой породы нарушенного сложения при влажности, равной пределу текучести, составляющее $0,076$ кгс/см².

Как показывают многолетние исследования, различные глинистые породы малой степени литификации и неустойчивой консистенции, переходящие при нарушении естественного сложения в текучее состояние, характеризуются обычно пластической прочностью, редко достигающей $0,8—1$ кгс/см² ($0,08—0,1$ МПа). Породы средней степени литификации, более устойчивой консистенции (при нарушении естественного сложения пластичны) имеют пластическую прочность, достигающую $15—20$ кгс/см² ($1,5—2,0$ МПа). Породы высокой и предельно высокой степени литификации характеризуются пластической прочностью десятки килограмм-сила на квадратный сантиметр (единицы мегапаскалей).

Для выполнения пенетрационных испытаний необходимо иметь: 1) пенетрометр — прибор с набором конических наконечников для пенетрационных испытаний; 2) оборудование для определения плотности и влажности пород; 3) журнал определенной формы.

Схема устройства пенетрометра показана на рис. V-58. В качестве наконечника для пенетрационных испытаний песчаных и глинистых пород многие специалисты рекомендуют пользоваться конусом с углом раскрытия 30° .

Последовательность определения

1. Из монолита породы естественного сложения и влажности или из массы, приготовленной из породы нарушенного сложения, но определенной заданной плотности и влажности, вырезают образец режущим кольцом диаметром $7—10$ см и высотой $3—5$ см. Одновременно из монолита отбирают пробу для определения плотности и влажности породы.

2. Кольцо с образцом устанавливают на столик пенетрометра, конический наконечник подводят к поверхности образца и вдавливают в породу заданной нагрузкой, прикладываемой ступе-

ниями в возрастающем порядке. Величину ступеней нагрузки на конус выбирают в зависимости от прочности породы: на слабые по 0,01—0,02 кгс ($\sim 0,1$ —0,2 Н), на породы средней плотности и прочности по 0,1—0,5 кгс (~ 1 —5 Н), на породы плотные и прочные по 0,5—1 кгс (~ 5 —10 Н).

Каждую ступень нагрузки прикладывают или по прекращении погружения конуса, или если за последние 30—60 с глубина его погружения увеличится не более чем на 0,01—0,02 см. Наблюдения за погружением конуса производят по индикатору.

3. При каждом испытании осуществляют от 4 до 10 ступеней нагрузки. Общая глубина погружения конуса должна достигать 10—15 мм. После прекращения погружения конуса от последней ступени нагрузки или условного затухания погружения (не более 0,01—0,02 см за 30—60 с) определяют глубину погружения конуса и общую нагрузку — усилие пенетрации. По этим данным вычисляют значения пластической прочности пород P_m (условное сопротивление сдвигу) и удельного сопротивления пенетрации $R_{пн}$. Опыт повторяют 3—5 раз в разных точках образца.

§ 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ПЕСКОВ ПО УГЛУ ЕСТЕСТВЕННОГО ОТКОСА

Для ориентировочного представления об угле внутреннего трения песков определяют угол их естественного откоса. Под последним принято понимать тот предельный угол наклона откоса, при котором порода в откосе находится в устойчивом состоянии — не осыпается, не оплывает и т. д.

В лабораторных условиях угол естественного откоса определяют только для песчаных и гравелистых пород. При этом чем больший объем породы подвергается испытанию, тем точнее получаются результаты. В зависимости от задания угол естественного откоса может определяться для песка, находящегося в воздушно-сухом состоянии, или для песка, помещенного в воду.

Для определения угла естественного откоса лабораторным путем необходимо иметь батарейную банку прямоугольной формы размером 10×20×30 см и транспортир или линейку с делениями.

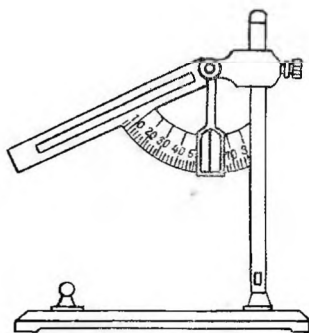
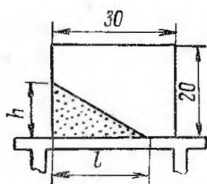
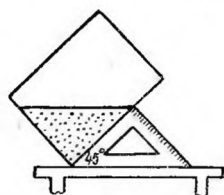
Последовательность определения угла естественного откоса сухого песка

1. В банку прямоугольной формы, поставленную на ребро под углом 45° (рис. V-59), насыпают исследуемый песок так, чтобы верхняя его поверхность была горизонтальной.

2. Затем батарейную банку ставят в нормальное положение, т. е. на дно, и оставляют в покое на некоторое время.

Рис. V-59. Определение угла естественного откоса песчаных пород.

Рис. V-60. Эклиметр конструкции Б. П. Остроумова для измерения угла естественного откоса.



3. После прекращения осыпания песка определяют угол естественного откоса при помощи транспорта или путем измерения высоты и длины заложения откоса линейкой и вычисления угла

$$\operatorname{tg} \varphi = h/l,$$

где h — высота откоса; l — длина заложения откоса.

Угол φ определяют по таблице тангенсов.

Угол естественного откоса песка в банке можно измерить с помощью эклиметра конструкции Б. П. Остроумова (рис. V-60). Эклиметр приставляют к банке, визирную линейку направляют вдоль откоса, а по отвесу на транспорте читают угол наклона откоса.

4. Опыт повторяют не менее трех раз, после чего определяют среднее арифметическое значение угла естественного откоса.

Последовательность определения угла естественного откоса песка, находящегося под водой

1. В батарейную банку, поставленную на ребро под углом 45° , насыпают исследуемый песок так, чтобы верхняя его поверхность была горизонтальной.

2. Песок покрывают листом бумаги для предохранения его от размыва при наполнении банки водой.

3. В банку осторожно наливают воду, после чего лист бумаги из банки медленно вытягивают.

4. При полном насыщении песка водой батарейную банку осторожно ставят на дно и оставляют в покое на несколько минут, после чего измеряют угол естественного откоса песка (под водой) способом, указанным выше. Для контроля банку с пес-

ком оставляют в покое на 10—12 ч, после чего вновь производят измерение.

5. Опыт повторяют не менее трех раз, как и при испытании песка в сухом состоянии.

Контрольные вопросы

1. Дайте общие понятия о механических свойствах горных пород.
2. Какие показатели характеризуют прочность горных пород?
3. Какие показатели характеризуют деформационные свойства горных пород?
4. Опишите определение модуля упругости, модуля общей деформации и коэффициента поперечного расширения горных пород методом одноосного сжатия.
5. Дайте принципиальную схему работы испытательной машины с механическим и гидравлическим приводами.
6. Как рассчитать удельную нагрузку на образец, передаваемую рычажным прессом?
7. Какие приборы применяют для измерения продольных и поперечных деформаций горных пород при испытаниях на сжатие и сдвиг?
8. Схема включения датчиков сопротивления при электротензометрическом методе измерения деформаций.
9. Диаграмма результатов испытаний горных пород на одноосное сжатие по методу одного, двух и трех циклов.
10. В чем сущность динамических методов исследования деформационных свойств горных пород?
11. Чем отличается метод ультразвукового прозвучивания от метода продольного профилирования?
12. Опишите методы определения коэффициента бокового давления горных пород.
13. График зависимости изменения бокового давления горных пород от вертикальной нагрузки.
14. Компрессионная кривая и параметры, ее характеризующие.
15. Порядок компрессионных испытаний горных пород.
16. Схема устройства компрессионно-фильтрационных приборов.
17. Определение коэффициента пористости горных пород при компрессионных испытаниях.
18. Как определяется эффективная нагрузка при компрессионных испытаниях?
19. Как строятся кривые консолидации пород при компрессионных испытаниях?
20. На основании каких данных можно судить о состоянии горных пород по результатам компрессионных испытаний?
21. Определение модуля общей деформации песчаных и глинистых пород по данным компрессионных испытаний.
22. Определение просадочности лёссовых пород по данным компрессионных испытаний.
23. Как определяется сила набухания глинистых пород?
24. Методика определения прочности горных пород по временному сопротивлению сжатию.
25. Определение прочности горных пород методом соосных пуансонов.
26. Какое оборудование необходимо для определения прочности горных пород по временному сопротивлению растяжению?
27. В чем сущность определения прочности горных пород на разрыв методом раскалывания?
28. Опишите устройство прибора ВНИМИ для испытания пород на ко-сой сдвиг.

29. Какие схемы применяются при изучении сопротивления песчаных и глинистых пород на сдвиг?

30. Устройство срезных приборов для исследования прочности песчаных и глинистых пород.

31. Построение диаграмм сопротивления сдвигу песчаных и глинистых пород.

32. Порядок проведения испытаний глинистых пород на сдвиг по методу Н. Н. Маслова.

33. Опишите устройство стабилметров и их назначение.

34. Как определяется осевое и боковое давление при трехосных испытаниях?

35. Как измеряются продольные и поперечные деформации горных пород при трехосных испытаниях?

36. Схемы передачи напряжений на породу в стабилметрах типов А и Б.

37. Диаграммы предельного напряжения сдвига глинистой и песчаной пород.

38. Схема прибора для пенетрационных испытаний.

39. Определение угла естественного откоса песчаных пород.

40. Необходимые размеры образцов горных пород для исследования их механических свойств.

**МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ
ОПРЕДЕЛЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД**

§ 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Каждое свойство горных пород обычно выражают и оценивают определенными показателями. В зависимости от того, какие особенности горных пород рассматриваются, следует различать показатели физических, водных и механических свойств [Ломтадзе В. Д., 1970, 1986 г.]. При лабораторных исследованиях о физико-механических свойствах толщи, слоя, пачки, зоны или разности горных пород судят на основании испытаний отдельных образцов или проб, соответствующим образом отобранных. При этих испытаниях все наблюдения, измерения и вычисления записывают в журнал определенной формы для каждого вида испытаний, а окончательный результат — в сводную ведомость (приложение 3).

Оценка физико-механических свойств горных пород не может производиться на основании единичных испытаний, определений и измерений, так как по своей природе все горные породы в той или иной степени неоднородны: их состав, строение и свойства изменяются от точки к точке. Многие из них анизотропны, т. е. их свойства неодинаковы в разных направлениях. Поэтому для достоверной и надежной характеристики горных пород производят многочисленные определения их свойств в лабораторных и полевых условиях. Каждая сводная ведомость содержит сводку показателей различных свойств горных пород, определенных по отдельным образцам, характеризующим горную породу в различных точках слоя, пачки, зоны. Обобщение и анализ данных этих исследований позволяют устанавливать степень их достоверности и надежности, чтобы характеризовать ту или иную толщу, слой, пачку, зону или разность горных пород.

Обобщение и анализ массовых данных исследований невозможен без применения методов математической статистики и теории вероятности. Однако применение этих методов требует строгого соблюдения правила геологической однородности горных пород в стратиграфическом, генетическом и петрографическом отношениях. Это значит, что обобщенные и расчетные показатели должны вычисляться:

1) отдельно для каждой разности пород, существенно отличающейся в геологическом разрезе по своим стратиграфическим,

генетическим и петрографическим признакам и строительным качествам, независимо от мощности слоя и его распространения; особое внимание надо обращать на выделение слабых со строительной точки зрения разностей пород;

2) при мощных толщах тонкопереслаивающихся пород (например, ленточных глин) следует выделять пачки с однотипным чередованием слоев пород, одинаковых или близких по составу и состоянию;

3) при петрографически однородных мощных толщах пород следует выделять отдельные зоны и подзоны, различающиеся по физическому состоянию, т. е. по степени влажности, плотности, выветрелости, трещиноватости, водопроницаемости и другим показателям. Нельзя объединять в одну статистическую совокупность данные о свойствах пород, показатели которых закономерно изменяются по простиранию или мощности слоя, пачки, зоны.

Следовательно, при использовании методов статистической обработки результатов изучения физико-механических свойств горных пород совершенно недопустим формальный негеологический подход к их обобщению, основанный на учете изменения только свойств.

Основы математической статистики общеизвестны, они изложены во многих учебниках и методических работах.

§ 2. НОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Если, соблюдая принцип геологической однородности, из каждого слоя, пачки, зоны или разности горных пород можно было бы отобрать бесконечно большое число проб (образцов) и произвести их испытание, мы получили бы бесконечно большое число определений показателей тех или иных свойств горной породы. В математической статистике и теории вероятности такая бесконечно большая совокупность показателей называется генеральной. Статистические характеристики генеральной совокупности соответственно называются генеральными.

При полевых и лабораторных исследованиях нельзя отобрать бесконечно большое число проб (образцов) и произвести бесконечно большое число определений и измерений свойств горных пород и, следовательно, нельзя установить их генеральные статистические характеристики. При этих исследованиях можно произвести только ограниченное число определений и измерений показателей свойств горных пород по пробам (образцам), рационально отобранным из каждого слоя, пачки, зоны или разности. В математической статистике такая совокупность ограниченного числа проб (образцов), отобранных из генеральной совокупности, и соответственно ограниченное число опреде-

лений показателей свойств называются выборочными или просто выборками.

Следовательно, при статистической обработке результатов лабораторных определений физико-механических свойств горных пород всегда имеют дело с выборкой, систематизированной для каждого слоя, пачки, зоны или разности горных пород в сводной ведомости. Объем выборки в зависимости от стадии исследований, ответственности и типа сооружений, детальности изученности объекта может составлять десятки, сотни и даже тысячи определений. Как указывает Н. В. Коломенский, выборки с числом членов более 30 условно называют большими, менее 30 — малыми.

При статистической обработке результатов исследований свойств горных пород обычно стоит задача оценить приближенно по данным выборки свойства генеральной совокупности.

Т а б л и ц а VI-1. Результаты определения плотности песчаников

об. Номер разра	Результат измерений, 10^{-2} г/см ³	об. Номер разра	Результат измерений, 10^{-2} г/см ³	об. Номер разра	Результат измерений, 10^{-2} г/см ³	об. Номер разра	Результат измерений, 10^{-2} г/см ³
1	228	11	234	21	242	31	233
2	231	12	232	22	237	32	239
3	235	13	236	23	243	33	245
4	219	14	246	24	231	34	230
5	237	15	240	25	238	35	248
6	238	16	240	26	233	36	235
7	247	17	251	27	231	37	239
8	240	18	245	28	241	38	230
9	233	19	241	29	223	39	237
10	229	20	235	30	234	40	244

Т а б л и ц а VI-2. Группирование данных и их обработка

Номер интер- вала i	Интервал, м	Середина интер- вала x_i	Частота n_i	Частость $k_i = \frac{n_i}{n}$	$\Psi(x_i) \approx \frac{k_i}{\Delta x}$ ($\Delta x = 5$)	Накоп- ленные частости $\Phi(x)$, %
1	217,5—222,5	220	1	0,025	0,005	
2	222,5—227,5	225	1	0,025	0,005	
3	227,5—232,5	230	8	0,200	0,040	5
4	232,5—237,5	235	12	0,300	0,060	25
5	237,5—242,5	240	10	0,250	0,050	55
6	242,5—247,5	245	6	0,150	0,030	80
7	247,5—252,5	250	2	0,050	0,010	95

Представим себе, например, что определялась плотность песчаников для 40 образцов (объем выборки $n=40$) и что результаты этих определений приведены в табл. VI-1. Как видно из этой таблицы, значения плотности песчаников изменяются или, как говорят, варьируют. Поэтому всю совокупность определений называют вариационным рядом. Полученные значения x сгруппируем по равным интервалам Δx в табл. VI-2, в которую впишем частоты * n_i попадания x в каждый интервал и соответствующие частоты $k_i = n_i/n$. Табл. VI-2 характеризует распределение значений плотности песчаников в рассматриваемой выборке. Частота k_i является приближенным значением (оценкой) вероятности p_i попадания величины x в i -й интервал. Так как вероятность попадания случайной величины в любой бесконечно малый интервал dx пропорциональна его величине, то для малого интервала Δx можно приближенно считать, что $p_i \approx \varphi(x_i)\Delta x$. Функция $\varphi(x)$ называется плотностью распределения вероятности случайной величины x . Она характеризует относительное число определений, попадающих на единицу длины каждого малого интервала Δx :

$$\varphi(x_i) \approx p_i/\Delta x \approx k_i/\Delta x.$$

Оценив, т. е. приближенно определив таким образом значения $\varphi(x_i)$ и отнеся их к серединам соответствующих интервалов, построим график распределения $\varphi(x)$ значений плотности песчаников, который для рассматриваемого примера в сглаженном виде приведен на рис. VI-1. В практике статистической обработки результатов исследований физико-механических свойств горных пород распределение значений каких-либо величин x обычно изображают в виде графиков рассеяния (точечных диаграмм), способ построения которых виден на рис. VI-2.

Графики распределения (см. рис. VI-1 и VI-2) физических величин x характеризуют возможные их значения в данной выборке, а также вероятности, с которыми эти значения могут появляться. При построении графиков важным практическим моментом является выбор интервала группирования Δx . С одной стороны, нужно стремиться к его уменьшению, так как плотность вероятности $\varphi(x)$ является дифференциальной характеристикой закона распределения. С другой стороны, чрезмерное уменьшение интервалов группирования при малом объеме выборки приводит к тому, что графики перестают быть плавными. Следовательно, на практике надо стремиться к выбору некоторого оптимального значения Δx .

* Частота — число определений, попавших в каждый интервал вариационного ряда. Частотами называются частоты, выраженные в долях единицы или в процентах от общего числа определений n .

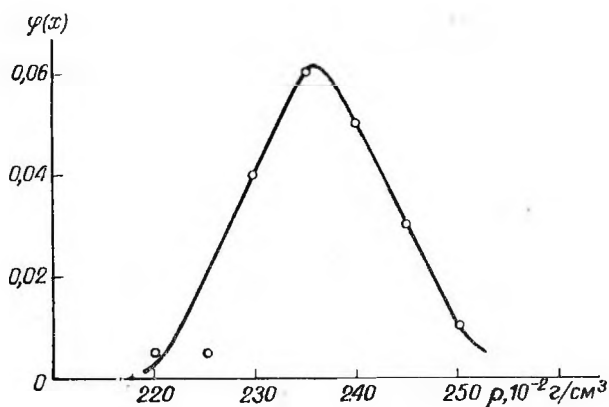


Рис. VI-1. График распределения $\varphi(x)$ значений плотности песчанников.

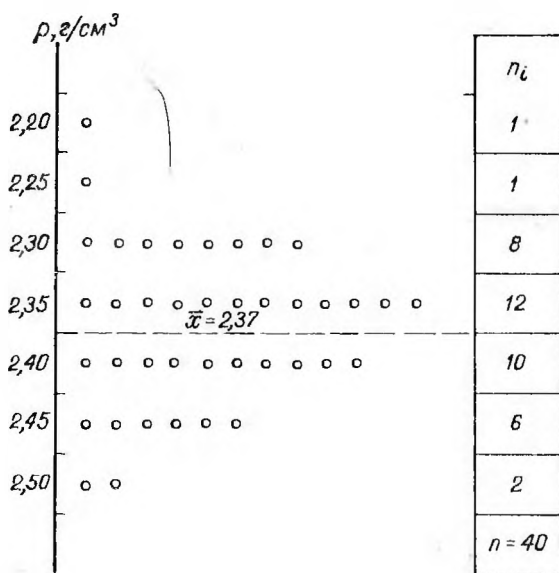


Рис. VI-2. График распределения (рассеяния) значений плотности песчанников.

§ 3. ОСНОВНЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Как известно из математической статистики и теории вероятности, нормальное распределение значений любого вариационного ряда достаточно полно оценивается следующими статистическими характеристиками: средним арифметическим значением, дисперсией (или, лучше, средним квадратическим отклонением) и коэффициентом вариации.

Среднее арифметическое значение $\bar{x}$ может рассматриваться как наиболее типичное (наиболее вероятное) значение показателя из всех значений, представленных в выборке. Величина $\bar{x}$ характеризует центр распределения в выборке и является оценкой (приближенным значением) генерального среднего $\bar{X}$. Выборочное среднее является обобщенным показателем свойства породы в слое, пачке, зоне или разности; его обычно называют нормативным.

Вычисление среднего арифметического значения обычно производят по формуле

$$\bar{x} = (1/n) \sum x_i n_i,$$

где $\bar{x}$ — среднее арифметическое значение выборки; x_i — среднее значение интервала группирования; n_i — частота; n — число определений физической величины, составляющее объем выборки.

Для характеристики породы по тому или иному свойству в слое, пачке или зоне, т. е. степени рассеяния (разброса) отдельных (частных) определений величины x около среднего значения $\bar{x}$ служат: дисперсия, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Дисперсия, так же как и математическое ожидание, является генеральной характеристикой распределения. Она равна

$$\sigma^2 = (1/n) \sum (x_i - \bar{X})^2 n_i.$$

По результатам опыта может быть вычислена только выборочная дисперсия s^2 . Причем так как генеральное среднее $\bar{X}$ обычно неизвестно, то его заменяют выборочным средним $\bar{x}$ и в формулу вводят поправочный коэффициент $n/(n-1)$. Тогда окончательное выражение для вычисления s^2 принимает вид

$$s^2 = [1/(n-1)] \sum (x_i - \bar{x})^2 n_i.$$

При большом объеме выборки выборочное среднее $\bar{x}$ очень близко к генеральному среднему $\bar{X}$ и в соответствии с этим поправочный коэффициент $n/(n-1)$ близок к единице.

Среднее квадратическое отклонение (стандарт), так же как и дисперсия, является мерой разброса отдельных частных значений и показывает, как велик этот разброс около среднего значения. При характеристике разброса значений, т. е. степени не-

однородности породы, обычно пользуются только средним квадратическим отклонением. Оно вычисляется по формуле

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{[1/(n-1)] \sum_i (x_i - \bar{x})^2 n_i}.$$

Среднее квадратическое отклонение имеет ту же размерность, что и среднее арифметическое.

Для характеристики степени разброса значений случайной величины x в выборке относительно среднего значения пользуются также безразмерной характеристикой (%) — коэффициентом вариации, который вычисляют по формуле

$$V = (s/\bar{x}) \cdot 100.$$

Характеристиками положения величины x на числовой оси графиков распределения (см. рис. VI-1 и VI-2) являются также медиана и мода.

Медиана распределения есть такое значение случайной величины, которое делит вариационный ряд пополам. На рис. VI-1 площадь, заключенная между кривой $\varphi(x)$ и осью абсцисс, делится прямой $x = x_{1/2}$ пополам и показывает, что значения x , меньшие, чем значения $x_{1/2}$, встречаются с такой же вероятностью, как и значения, превышающие $x_{1/2}$.

Мода непрерывного распределения есть точка максимума плотности распределения вероятности $\varphi(x)$, т. е. это наиболее часто встречающееся значение величины x в выборке. Если в распределении какого-либо показателя свойств горной породы выявляется не один максимум, т. е. больше, чем одна мода, это обычно свидетельствует о неоднородности породы по этому свойству. Если распределение одномодально и симметрично, то среднее значение, медиана и мода совпадают.

При инженерно-геологической оценке свойств горных пород в слое, пачке, зоне часто бывает необходимо знать также, в каких пределах изменяется то или иное их свойство от значения минимального $x_{\min}$ до значения максимального $x_{\max}$. Чем больше этот интервал, тем неоднороднее порода по данному свойству. При установлении минимальных и максимальных значений обычно исключают значения, явно отличающиеся от всей массы определений, измерений и наблюдений (см. гл. I, § 6). Такие грубые отклонения, не характерные для всей совокупности определений, связаны со случайными примесями или включениями, с неточностями отбора проб, измерений и записей.

Малые вероятности, которыми пренебрегают при обработке материалов, называют уровнем значимости. При обычных статистических расчетах выбирают уровень значимости, равный 5 %. Следовательно, если уровень значимости принят равным 5 %, то в интервале от $x_{\min}$ до $x_{\max}$ должно находиться 95 % всех определений x . Это, как известно, соответствует интервалу $(\bar{x} - 2s, \bar{x} + 2s)$.

График распределения (см. рис. VI-1) и статистические характеристики $\bar{x}$, s , $x_{\min}$ и $x_{\max}$ достаточно полно характеризуют особенности горных пород по тому или иному свойству только в том случае, если распределение имеет нормальный характер, т. е. приближается к теоретическому закону нормального распределения. Как показывает практика, при статистической обработке результатов исследований физико-механических свойств горных пород чаще всего приходится иметь дело с нормальным и логарифмически нормальным (логнормальным) распределениями. В последнем случае нормально распределены логарифмы значений показателей.

Нормальное распределение встречается тогда, когда случайные отклонения величины x от ее математического ожидания являются следствием множества равноправных случайных причин. В этом случае график распределения случайных величин имеет одновершинную или близкую к ней симметричную форму.

Логарифмически нормальное распределение встречается в тех случаях, когда разброс значений случайной величины x растет вместе с x (например, прочность и водопроницаемость горных пород могут увеличиваться на несколько порядков).

Для того чтобы получать более точные значения показателей распределения случайных величин, т. е. наиболее приближающиеся к теоретическому закону распределения, возникает необходимость при статистической обработке материалов иметь достаточные объемы выборок (оптимальное число проб, оптимальное число определений свойств и т. д.) и проверять нормальность распределения случайных величин. Для такой проверки обычно пользуются двумя показателями, характеризующими форму кривых распределения, ими служат асимметрия A и эксцесс E :

$$A = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{ns^3};$$

$$E = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4}{ns^4} - 3,$$

где $\sum (x_i - \bar{x})^3$ и $\sum (x_i - \bar{x})^4$ — сумма третьих или четвертых отклонений отдельных величин от среднего арифметического; n — число определений; s — среднее квадратическое отклонение.

Для нормального характера распределения случайных величин показатели асимметрии и эксцесса должны быть равны нулю. Кроме того, распределение считается не противоречащим нормальному, если отношение A и E к их погрешностям не превышает 1,5, т. е.

$$A/m_A \leq 1,5 \text{ и } E/m_E \leq 1,5,$$

где

$$m_A = \pm \sqrt{6/n} \text{ и } m_E = \pm \sqrt{24/n}.$$

Как отмечено выше, обобщенными, или нормативными, показателями свойств горных пород обычно называют их средние арифметические значения. Для показателей же удельного сцепления c и угла внутреннего трения $\text{tg}\varphi$ нормативные значения определяют особо (ГОСТ 20522—75). Для определения обобщенных (нормативных) значений этих показателей обработку результатов производят по методу наименьших квадратов всей совокупности опытных данных следующим образом:

$$\text{tg}\varphi = \frac{1}{\Delta} \left(n \sum_{i=1}^n \tau_i \sigma_i - \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i \right);$$

$$c = \frac{1}{\Delta} \left(\sum_{i=1}^n \tau_i \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \tau_i \sigma_i \right),$$

где $\Delta = n \sum_{i=1}^n (\sigma_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2$; τ_i и σ_i — частные значения соответственно сопротивления сдвигу и нормального давления; n — число определений (объем выборки).

Среднее квадратическое отклонение s для c и $\text{tg}\varphi$ вычисляют по формулам

$$s_c = s_\tau \sqrt{\frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2};$$

$$s_{\text{tg}\varphi} = s_\tau \sqrt{\frac{n}{\Delta}},$$

$$\text{где } s_\tau = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\sigma_i \text{tg}\varphi + c - \tau_i)^2}.$$

Здесь $\text{tg}\varphi$ и c — нормативные значения.

§ 4. ПОРЯДОК СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

1. В соответствии с правилом геологической однородности все данные лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород записывают в сводную ведомость отдельно для каждого слоя, пачки, зоны или разности пород. Если такая систематизация данных при выпуске материалов из лаборатории не произведена, ее выполняют приступая к их обработке. В результате получают выборки, подобные показанной в табл. VI-1. Выделение слоев, пачек, зон и разностей горных пород производится геологом при выполнении полевых работ на основании совокупности данных — стратиграфических, генетических, петрографических — с учетом физического состояния и свойств горных пород.

2. Полученные значения показателей $\text{tg}\varphi$ или иных свойств

горных пород группируют по равным интервалам Δx так, как это показано в табл. VI-2. Из этой таблицы видно, что в рассматриваемом примере выделено семь интервалов и показаны значения интервалов, их средние значения x_i , частоты n_i , частоты k_i , плотности распределения или относительное число определений, попадающих на единицу длины каждого малого интервала Δx , т. е. $\varphi(x_i)$, и накопленные частоты $\Phi(x)$, %.

3. По данным составленной таким образом вспомогательной табл. VI-2 строят графики распределения (см. рис. VI-1 и VI-2). При обработке результатов исследований физико-механических свойств горных пород целесообразно графики распределения изображать главным образом в виде графиков рассеяния — точечных диаграмм (см. рис. VI-2). На этом графике по оси ординат в выбранном масштабе обозначают интервалы значений показателя свойств породы Δx , в пределах которых записывают средние значения каждого интервала x_i . Ось абсцисс шкалы не имеет, и значения каждого определения фиксируются точкой по горизонтали в пределах каждого интервала, исходя из удобства изображения и наглядности. Следовательно, число точек на графике должно равняться числу выполненных определений.

На таких графиках наглядно видно: а) общее число определений, составляющих выборку n , т. е. массовость, представительность значений, на которых базируется характеристика свойств породы; б) возможные пределы изменения того или иного свойства; в) возможные значения показателей свойств горной породы в данной выборке, а также вероятности, с которыми эти значения могут появляться в интервале от $x_{\min}$ до $x_{\max}$; г) наиболее часто повторяющееся значение величины x в выборке, т. е. модальное значение x_{mod} ; д) степень однородности породы по тому или иному свойству.

Т а б л и ц а VI-3. Схема подготовки данных для вычисления $\bar{x}$ и s

x_i	$\Delta x_i = x_i - x_0$ ($x_0 = 230$)	n_i	$\Delta x_i n_i$	$\Delta x_i^2 n_i$
220	—10	1	—10	100
225	—5	1	—5	25
230	0	8	0	0
235	5	12	60	300
240	10	10	100	1000
245	15	6	90	1350
250	20	2	40	800
С у м м а		40	275	3575

4. Используя табл. VI-2 и график распределения — рассеяния (см. рис. VI-2), вычисляют статистические характеристики. При большом числе измерений для вычисления $\bar{x}$ и s удобно использовать следующую схему. Выбрав в качестве «условного нуля» произвольное значение x_0 , заменим значения x_i , указанные в табл. VI-2, значениями $\Delta x_i = x_i - x_0$ и влишем их в табл. VI-3. Вычислив суммы по трем последним столбцам этой таблицы, определим $\bar{x}$ и s по приведенным выше формулам.

Для рассматриваемого примера получим

$$\bar{x} = 230 + 275/40 \approx 237 \cdot 10^{-2} = 2,37 \text{ г/см}^3;$$

$$s = \sqrt{(3575/40)(230 - 237)^2} \approx 6,4 \cdot 10^{-2} = 0,064 \text{ г/см}^3,$$

откуда коэффициент вариации

$$V = (0,064/2,37) \cdot 100 = 2,66 \text{ \%}.$$

Принимая уровень значимости равным 5 % и, следовательно, пренебрегая малыми крайними вероятностями, устанавливаем, что из 40 определений 38 определений, т. е. 95 %, должны находиться в интервале от $x_{\min} = 2,24 \text{ г/см}^3$ до $x_{\max} = 2,50 \text{ г/см}^3$.

Таким образом, для рассматриваемого примера обработки результатов исследований плотности песчаников получаем следующую сводку.

Число определений n	40
Среднее арифметическое значение $\bar{x}$, г/см ³	2,37
Среднее квадратическое отклонение s , г/см ³	0,064
Коэффициент вариации V , %	2,66
Минимальное значение $x_{\min}$, г/см ³	2,24
Максимальное значение $x_{\max}$, г/см ³	2,50

Нормальность распределения плотности песчаников в известной мере характеризуется формой графика распределения (см. рис. VI-1). Вычислив значения показателей A и E и отношения к этим показателям их погрешностей, проверяют нормальность распределения плотности песчаников.

Характер распределения значений плотности песчаников показан на рис. VI-1 и VI-2. Все эти данные позволяют установить среднее обобщенное значение плотности песчаников, а также характер и величину его изменчивости.

§ 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ТРАФАРЕТА ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При обработке результатов исследований очень удобно пользоваться вероятностным трафаретом для построения графика распределения накопленных частот и по нему быстро определять значения основных статистических характеристик. На этом графике (рис. VI-3) по оси абсцисс в обычном равномерном масштабе откладывают величины исследуемого физического параметра горной породы (в нашем примере плотность песчаника). По оси ординат показывают значения накопленных

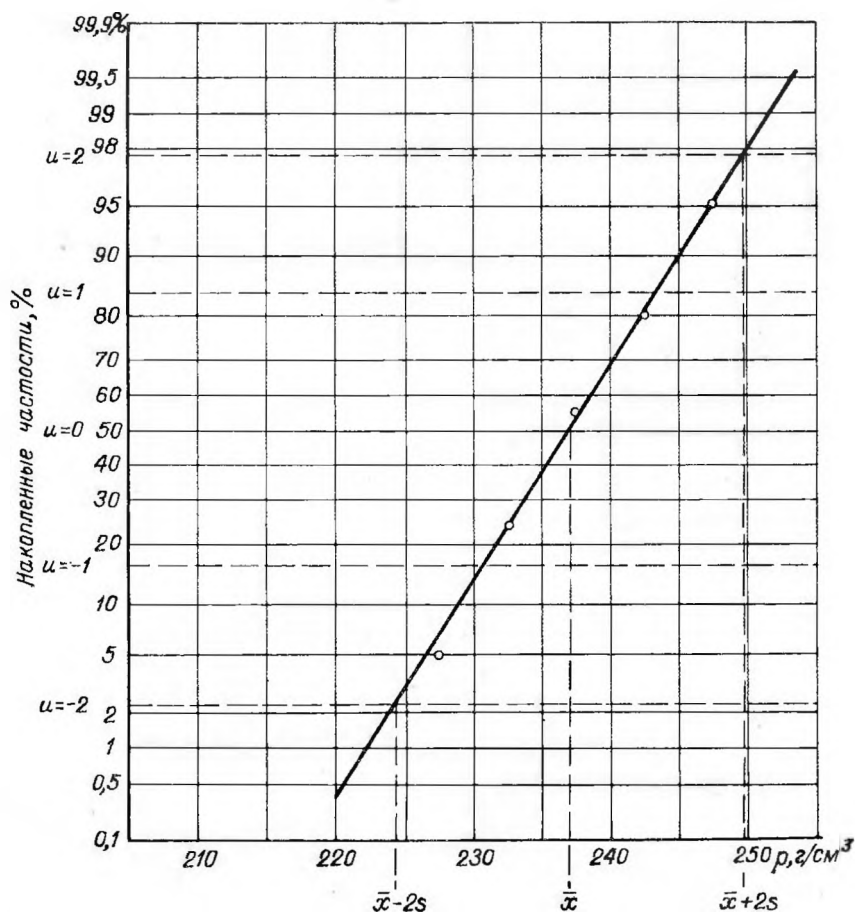


Рис. VI-3. График распределения частот значений плотности песчанников на вероятностном трафарете.

частотей, но не в равномерном масштабе, а в масштабе, определяемом формулой для интегральной функции $\Phi(u)$. Эта функция называется функцией Лапласа или интервалом вероятностей. Ее значения обычно приводятся в виде таблиц во всех курсах и руководствах по математической статистике. Некоторые значения $\Phi(u)$ приведены в табл. VI-4.

На вероятностном трафарете при его построении вместо значений $\Phi(u)$ по оси ординат показывают значения u (см. табл. VI-4), а оцифровка этих значений соответствует $\Phi(u)$ в процентах. Построение графика распределения накопленных частотей на трафарете производится следующим образом. Например, для

Таблица VI-4. Значения интеграла вероятностей

u	$\Phi(u)$	u	$\Phi(u)$	u	$\Phi(u)$	u	$\Phi(u)$
-3,29	0,0005	-1,64	0,05	3,29	0,9995	1,64	0,95
-3,00	0,001	-1,28	0,10	3,00	0,999	1,28	0,90
-2,70	0,003	-1,00	0,16	2,70	0,997	1,00	0,84
-2,58	0,005	-0,84	0,20	2,58	0,995	0,84	0,80
-2,38	0,010	-0,52	0,30	2,33	0,99	0,52	0,70
-2,00	0,023	-0,25	0,40	2,00	0,977	0,25	0,60
-1,96	0,025	0,00	0,50	1,96	0,975		

выборки, приведенной в табл. VI-1, накопленные частоты в процентах выписаны в табл. VI-2. Относя значения накопленных частот к верхним границам интервалов группирования (227,5; 232,5; 237,5 и т. д.), нанесем точки $\Phi(x_1 + 0,5 \Delta x)$ на вероятностный трафарет (см. рис. VI-3). Проведя через нанесенные на трафарет точки прямую линию, найдем на ней точки с ординатами $\bar{u} = -2$, $\bar{u} = 0$, $\bar{u} = 2$. Абсциссы этих точек равны соответственно $\bar{x} - 2s$, $\bar{x}$, $\bar{x} + 2s$ (224; 237 и 250 для рассматриваемого примера). Получив эти результаты, сразу же определим $\bar{x} = 237$ и $s = (1/4)(250 - 224) = 6,5$. Так как в диапазоне $(\bar{x} - 2s, \bar{x} + 2s)$ находится примерно 95 % всех значений x , то, приняв уровень значимости $\alpha = 5$ %, можно считать, что в данном исследовании $x_{\min} = 224$, $x_{\max} = 250$.

Таким образом, построив на вероятностном трафарете график накопленных частот, можно быстро и просто получить оценки параметров нормального распределения.

График позволяет также оценить близость рассматриваемого распределения к нормальному. Обозначим через $D_{\max}$ максимальную разность накопленных частот эмпирического и теоретического распределений. На рис. VI-3 эмпирическому распределению соответствуют нанесенные на трафарет точки, а теоретическому — проведенная прямая; $D_{\max}$ в данном случае наблюдается в нижней точке: $D_{\max} \approx 2,3$ %. Для оценки близости распределения к нормальному используется не сам параметр $D_{\max}$, а критерий Колмогорова, который вычисляется по формуле $\lambda = D_{\max} \sqrt{n}$. В нашем примере $\lambda = 0,023 \sqrt{40} \approx 0,14$.

Если окажется, что λ больше некоторого значения λ_α , то считают, что опытное распределение противоречит теоретическому. Значения λ_α для некоторых уровней значимости α (в процентах) следующие.

α	10	5	2	1	0,5	0,1
λ_α	1,224	1,358	1,517	1,627	1,731	1,950

В нашем примере уровень значимости принят равным 5 %. Следовательно, $\lambda_\alpha = 1,358$ и $\lambda < \lambda_\alpha$. Таким образом, рассматриваемое распределение не противоречит нормальному.

§ 6. УСТАНОВЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Для установления расчетных показателей в большинстве случаев уточняют обобщенные (нормативные) значения, а затем вносят в них соответствующие различным случаям поправки. При этом необходимо подчеркнуть, что расчетные показатели определяют не вообще, а только в связи с проектированием и строительством конкретного сооружения (или группы однотипных сооружений) для каждого определенного слоя, пачки, зоны или разности горных пород, которые выбраны в качестве основания, среды или материала для этого сооружения на отведенном для его размещения участке. Такая степень определенности рассматриваемого вопроса обычно наступает тогда, когда разработка проекта и детальность инженерно-геологических исследований достигнут определенного уровня. До этого момента расчеты носят, как правило, предварительный характер и для них используются обобщенные показатели. Все это предполагает надлежащую осторожность при установлении расчетных показателей, гарантирующую от возможных ошибок при оценке устойчивости сооружений или от необходимости выполнения излишних объемов строительных работ.

При проектировании естественных оснований зданий и сооружений СНиП 2.02.01—83 для установления расчетных показателей рекомендует вносить в обобщенный показатель поправку на надежность пород

$$R_{\text{расч}} = R_{\text{норм}}/K_n,$$

где $R_{\text{расч}}$ — значение расчетного показателя; $R_{\text{норм}}$ — значение нормативное — средний обобщенный показатель (среднее выборочное $\bar{x}$); K_n — коэффициент надежности (безопасности), зависящий от горной породы, который устанавливают по формуле

$$K_n = 1/(1 \pm \epsilon),$$

откуда

$$R_{\text{расч}} = R_{\text{норм}}(1 \pm \epsilon),$$

где ϵ — погрешность определения генерального среднего какого-либо показателя свойств горных пород. Знак перед величиной ϵ принимается таким, который обеспечивает большую надежность расчета. В рассмотренном выше примере для плотности песчанников целесообразно принять большее значение.

Коэффициент надежности K_n , согласно СНиП 2.02.01—83 и ГОСТ 20522—75, для показателей удельного сцепления и угла внутреннего трения песчано-глинистых пород, предела прочности на одноосное сжатие скальных и полускальных пород, а также плотности любых пород необходимо устанавливать в зависимости от неоднородности их свойств, числа определений показателей свойств и значения принятой доверительной вероят-

ности p . Для всех других показателей свойств горных пород допускается принимать K_n равным единице.

Сущность метода учета доверительной вероятности заключается в следующем. Выборочное среднее $\bar{x}$ является оценкой генерального среднего $\bar{X}$. Для того чтобы эту оценку сделать более точной, необходимо установить пределы возможных значений $\bar{X}$ или, говоря более строго, установить, в пределах какого интервала $(\bar{x}-\epsilon, \bar{x}+\epsilon)$ лежит $\bar{X}$ при заданной вероятности $p=1-\alpha$. Значения этой вероятности обычно принимаются равными 0,90; 0,95; 0,99 в зависимости от конкретного содержания решаемой задачи — от принятого уровня значимости α . Величину $p=1-\alpha$ называют доверительной вероятностью или надежностью, интервал $(\bar{x}-\epsilon, \bar{x}+\epsilon)$ — доверительным интервалом, а границы $\bar{x}-\epsilon$ и $\bar{x}+\epsilon$ — доверительными границами или пределами, где ϵ — погрешность определения генерального среднего.

Доверительные пределы должны устанавливаться с определенной гарантией надежности. Следовательно, они должны быть гарантированными пределами, один из которых должен отвечать возможному минимуму, а другой — возможному максимуму значений $\bar{X}$:

$$\bar{x}-\epsilon < \bar{X} < \bar{x}+\epsilon.$$

Один из этих пределов с успехом может служить расчетным значением, гарантирующим от ошибок. Однако СНиП 2.02.01—83 и ГОСТ 20522—75, как показано выше, рекомендуют при установлении расчетных показателей использовать не гарантированные пределы, а коэффициент надежности K_n .

При нормальном распределении величины x оценку доверительных границ производят по распределению t -критерия Стьюдента

Таблица VI-5. Значения t -критерия Стьюдента

f	p				f	p			
	0,70	0,90	0,95	0,99		0,70	0,90	0,95	0,99
1	1,963	6,314	12,706	63,657	14	1,076	1,761	2,145	2,977
2	1,336	2,920	4,303	9,925	15	1,074	1,753	2,131	2,947
3	1,250	2,253	3,182	5,841	16	1,071	1,746	2,120	2,921
4	1,190	2,132	2,776	4,604	17	1,069	1,740	2,110	2,898
5	1,156	2,015	2,571	4,032	18	1,067	1,734	2,101	2,878
6	1,134	1,943	2,447	3,707	19	1,066	1,729	2,093	2,861
7	1,119	1,895	2,365	3,499	20	1,064	1,725	2,086	2,845
8	1,108	1,860	2,306	3,355	25	1,058	1,708	2,060	2,787
9	1,100	1,833	2,262	3,250	30	1,055	1,697	2,042	2,750
10	1,093	1,812	2,228	3,169	40	1,050	1,684	2,021	2,704
11	1,088	1,796	2,202	3,106	60	1,046	1,671	2,000	2,660
12	1,083	1,782	2,179	3,055	120	1,011	1,658	1,980	2,617
13	1,079	1,771	2,160	3,012	∞	1,036	1,645	1,960	2,576

дента. Это распределение зависит от двух параметров: $f=n-1$ и t . Значение t приведено в табл. VI-5 для $p=0,90; 0,95$ и $0,99$. Пользуясь этой таблицей, можно для заданных значений n и p определить t и затем вычислить значение ϵ по следующим выражениям:

для малой выборки ($n < 30$)

$$\epsilon = ts/\sqrt{n-1};$$

для большей выборки ($n > 30$)

$$\epsilon = ts/\sqrt{n},$$

где s — среднее квадратическое отклонение величины $\bar{x}$ от $\bar{X}$.

Вернемся к примеру, который рассматривался выше. Для распределения плотности песчанников установили его близость к нормальному распределению и получили $\bar{x}=2,37$ г/см³ и $s=0,064$ г/см³. Найдём теперь границы $2,37-\epsilon$ и $2,37+\epsilon$ интервала, в пределах которого лежит генеральное среднее с вероятностью $p=0,95$. В данном случае число определений $n=40$; $s = 0,064/\sqrt{40} \approx 0,01$. По табл. VI-5 определим t ($f=40, p=0,95$) $\approx 2,02$. Следовательно, $\epsilon = 2,02 \cdot 0,01 \approx 0,02$ и, значит, генеральное среднее (математическое ожидание) величины x находится в интервале $(2,35, 2,39)$ с доверительной вероятностью 95 %, а расчетное значение плотности можно принять равным 2,39; с учетом коэффициента K_n оно будет равно

$$R_{\text{присч}} = 2,37 \cdot 1,02 = 2,42.$$

При большом числе измерений для оценки доверительных границ можно пользоваться и нормальным распределением, так как при больших f распределение Стьюдента очень близко к нормальному. В этом случае $\epsilon = -us$, где u определяется по табл. VI-4 для $\Phi(u) = \alpha/2$. В нашем примере $\alpha = 1 - p = 0,05$; $\Phi(u) = \alpha/2 = 0,025$. Из табл. VI-4 получим $u = -1,96$. Следовательно, $\epsilon = 1,96 \cdot 1,03 \approx 2$.

Доверительную вероятность p при установлении расчетных показателей свойств горных пород обычно принимают равной 0,85 (при расчете оснований сооружений по деформациям) или равной 0,95 (при расчете оснований сооружений по прочности). В отдельных случаях при соответствующем обосновании для зданий и сооружений I класса доверительную вероятность расчетных показателей допускается принимать равной 0,99.

В связи с неоднородностью пород расчетное значение иногда можно принимать равным среднему, уменьшенному или увеличенному в зависимости от решаемой задачи на один стандарт. Например, при расчете притока воды к строительному котловану расчетное значение коэффициента фильтрации для гарантии надо увеличивать, а при решении задач водоснабжения, при расчете притока воды к водозабору — уменьшать.

При проектировании отдельных крупных сооружений и при решении разнообразных специальных задач (например, при оценке устойчивости оползней, откосов и др.) расчетные показатели часто устанавливают по средним максимальным или

средним минимальным статистическим значениям либо по доверительным пределам. Сущность средних максимальных или минимальных значений состоит в следующем. Определяют возможный интервал изменения показателя свойства горной породы при заданном уровне значимости α (см. выше). Пренебрегая малыми вероятностями, устанавливают минимальные и максимальные значения для рассматриваемой совокупности и затем вычисляют среднее максимальное и среднее минимальное значения:

$$x_{\text{ср max}} = (\bar{x} + x_{\text{max}})/2; \quad x_{\text{ср min}} = (\bar{x} + x_{\text{min}})/2.$$

Одно из этих значений в зависимости от решаемой задачи и принимают за расчетное как гарантирующее от ошибок.

§ 7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВМ ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время электронные вычислительные машины широко используются многими организациями для выполнения разнообразных трудоемких расчетов. Статистическая обработка результатов исследований физико-механических свойств горных пород также является трудоемким процессом, в особенности в тех случаях, когда требуется оценить параметры распределений сразу многих случайных величин, вычислить коэффициенты корреляции, оценивающие, насколько близка к линейной связь нормально распределенных случайных величин, и провести другие расчеты.

Удобство использования ЭВМ для такой полной обработки материалов исследований заключается в том, что сейчас все операции вычисления статистических показателей сведены в единые программы, которые занесены в память машин на магнитные ленты или диски. Такие программы разработаны многими организациями (единой стандартной программы пока нет), но все они позволяют быстро получать для каждой выборки объемом n определений такие параметры, как $\bar{x}$, s^2 , s , V , Max , Min , Mod , Med , A , E , m_A , m_E и другие, в том числе расчетные при заданной доверительной вероятности p . Кроме обработки каждой выборки в нормальном масштабе одновременно может быть выполнена обработка в логарифмическом масштабе. Для каждой выборки проверяется близость распределения к нормальному и логарифмически нормальному.

В общем использование ЭВМ целесообразно и необходимо при статистической обработке материалов исследований физико-механических свойств горных пород, как и других материалов инженерных изысканий, и при расчетах. Для этого необходимо материалы исследований соответствующим образом подготовить. Данные сводной ведомости (см. приложение 3) для каж-

дого слоя, начки, зоны, разности горных пород выписывают на специальные бланки и получают числовые массивы $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $(x'_1, x'_2, \dots, x'_m)$, $(x''_1, x''_2, \dots, x''_R)$. Для того чтобы эти числовые данные ввести в машину, их переносят на перфокарты с помощью перфоратора. Получают таким образом пакет перфокарт с исходной информацией. Перфокарты необходимо тщательно проверить и устранить ошибки, которые могут возникнуть при перфорации.

Для того чтобы дать указания машине, какие арифметические и логические операции необходимо выполнить с вводимой в машину исходной информацией, служит второй пакет перфокарт. Этот пакет содержит управление заданием — команды, соответствующие выбранной программе, находящейся в памяти машины. Этим пакетом перфокарт располагает вычислительный центр или пользователь — инженер-геолог, выполняющий исследование. Оба пакета перфокарт с исходной информацией и управлением заданием передают в вычислительный центр, который затем выдает результаты в виде распечатки (приложение 4).

Контрольные вопросы

1. В чем состоит сущность правила геологической однородности, которое необходимо соблюдать при изучении физико-механических свойств горных пород?

2. Какие показатели физико-механических свойств горных пород вычисляют при статистической обработке результатов их исследований и что они характеризуют?

3. Какие показатели физико-механических свойств горных пород принято называть обобщенными (нормативными), а какие расчетными?

4. Как обосновывается выбор расчетных показателей физико-механических свойств горных пород?

Инструкция по тарировке ареометра *

При определении гранулометрического состава глинистой породы ареометрическим методом для вычисления диаметра частиц пользуются особой номограммой (см. рис. II-9), 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 напечатаются в лаборатории для каждого ареометра отдельно. Для того чтобы нанести эту шкалу, надо для каждого отсчета по ареометру (для каждого тысячного деления) подсчитать соответствующее ему значение H_R .

Подсчет производят по формуле

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

где H_R — расстояние от данного деления шкалы ареометра до центра его водоизмещения (см), или путь, проходимый частицами от поверхности суспензии до центра водоизмещения ареометра при погружении его в суспензию, которая имеет плотность, отвечающую 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 луковицы ареометра, см (величина постоянная для данного ареометра); b — высота поднятия воды в цилиндре при погружении ареометра до центра водоизмещения луковицы, см;

$$b = V_0 / (2F),$$

V_0 — объем луковицы 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 погрешностью до ± 1 мм).

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

Значения H_R , отвечающие делениям шкалы для данного экземпляра ареометра, которые заносят в таблицу тарировки, определяют следующим образом.

Определение V_0 . Сначала определяют V_0 — объем луковицы 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

* Эта инструкция по гранулометрическому анализу пород ареометрическим способом заимствована из работы И. В. Попова и Н. И. Веприцкой.

с точностью до 10 см³, наливают от 900 до 920 см³ (по нижнему краю мениска) дистиллированной воды, имеющей температуру 20 °С. Погружают ареометр до деления 1,030 (по верхнему краю мениска) и записывают увеличение объема, отвечающее подъему уровня воды в цилиндре (по нижнему краю мениска) при ареометре, погруженном до деления 1,030. Это и есть объем луковицы ареометра (см³), т. е. V_0 .

Пример. Количество воды в цилиндре без ареометра равно 900 см³, количество воды в цилиндре с погруженным в нее ареометром равно 967 см³. Следовательно,

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

Определение а. 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 половину объема луковицы $V_0/2$, т. е. при погружении ее до центра водоизмещения. Не вынимая ареометра и строго сохраняя его погружение до половины объема, измеряют миллиметровой линейкой расстояние (см) от поверхности воды до нижнего деления на шкале ареометра, т. е. до 1,030. Таким образом получают величину a .

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

$$900 + 33,5 = 933,5 \text{ см}^3.$$

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

Определение л. Прикладывая линейку к шкале ареометра от нижнего деления, т. е. от 1,030, до 1,000, получают величину l (см), например, 10,35 см.

Определение N. Для ареометров N — число постоянное, и для ареометра с нижними делениями 1,030 оно равно 30.

Определение b. Высоту b измеряют линейкой или вычисляют по формуле

$$b = V_0/(2F),$$

значение F получают подсчетом по формуле площади круга:

$$F = \pi d^2/4,$$

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

Определение M. Для ареометров M — число переменное, соответствующее количеству тысячных делений на шкале ареометра, находящихся над уровнем суспензии до деления 1,000 в зависимости от погружения ареометра. Число M всегда равно R . Например, при некоторых приведенных ниже показаниях ареометра величины M и R имеют следующие значения.

Показания ареометра	M, R	Показания ареометра	M, R
1000	0	1008	8
1001	1	1017	17
1005	5	1021	21
		1030	30

Взяв значения 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 значения R 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица температурных поправок (ТП) по Пуазейлю

$T, ^\circ\text{C}$	ТП	$T, ^\circ\text{C}$	ТП	$T, ^\circ\text{C}$	ТП	$T, ^\circ\text{C}$	ТП
10,0	1,36	14,0	1,52	18,0	1,68	22,0	1,84
10,5	1,38	14,5	1,55	18,5	1,70	22,5	1,86
11,0	1,40	15,0	1,56	19,0	1,72	23,0	1,88
11,5	1,42	15,5	1,58	19,5	1,74	24,0	1,92
12,0	1,44	16,0	1,60	20,0	1,76	25,0	1,96
12,5	1,46	16,5	1,62	20,5	1,78	26,0	2,00
13,0	1,48	17,0	1,64	21,0	1,80	27,0	2,04
13,5	1,50	17,5	1,66	21,5	1,82	28,0	2,08

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Сводная ведомость определений физико-механических свойств горных пород

Лабораторный номер	Номер пробы	Место взятия пробы		Полевое определение породы	Возраст	Гранулометрический состав, %							
		Номер ботки	Глубина взятия пробы, м			>10 мм	10—5 мм	5—3 мм	3—2 мм	2—1 мм	1,0—0,5 мм	0,5—0,25 мм	0,25—0,05 мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Продолжение

Гранулометрический состав, %				Влажность, %	Плотность, г/см ³	Плотность скелета, г/см ³			Плотность минеральной части, г/см ³	Пористость, %	Коэффициент пористости	Полная влагоемкость	Коэффициент насыщения	Пределы пластичности	
0,05—0,01	0,01—0,002	0,002—0,001	<0,001			естественного сложения	рыхлого сложения	плотного сложения						Предел текучести	Предел пластичности
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

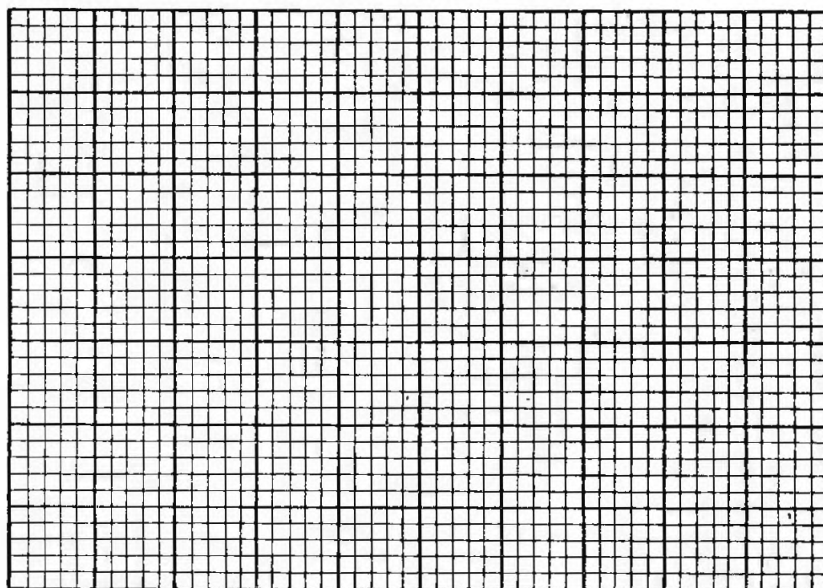
Продолжение

Пределы пластичности		Потери при прокаливании, %	Угол естественного откоса		Коэффициент фильтрации при $T = 10^{\circ}\text{C}$, см/с	Временное сопротивление сжатию	Влажность W при определенном временном сопротивлении сжатию	Временное сопротивление разрыву	Влажность W при определенном временном сопротивлении разрыву	Примечание
Число пластичности	Коэффициент относительной плотности		сухой породы	породы под водой						
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41

ПРИЛОЖЕНИЕ К СВОД

Гранулометрический состав, %												Плотность, г/см ³	Плотность при естественной влажности	Плотность скелета	Плотность минеральной части, г/см ³	Пористость, %	Коэффициент пористости	Степень насыщения
Фракция, мм																		
>5,0	5,0—3,0	3,0—2,0	2,0—1,0	1,0—0,50	0,50—0,25	0,25—0,10	0,10—0,05	0,05—0,01	0,01—0,002	0,002—0,001	<0,001	Влажность, %						

е



б, МПа

Испытания	Тип прибора	Высота образца	Площадь образца	Время	
				Начало	Окончание
Определение компрессионных свойств					
Определение сопротивления сдвигу					
Определение фильтрации					

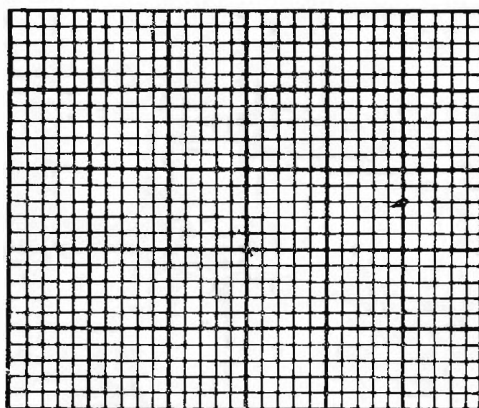
НОЙ ВЕДОМОСТИ

Предел пластичности			Временное сопротивление сжатию	Временное сопротивление разрыву
Предел текучести	Предел пластичности	Число пластичности		
Потери при прокаливании			кгс/см ² (МПа)	кгс/см ² (МПа)
			W, %	W, %

Лабораторный номер		Номер пробы
Номер выработки	Глубина взятия образца	Название породы
Сложение		

σ , кгс/см ² (МПа)	W , %	ρ , г/см ³	$\frac{\Delta h}{h}$	ϵ	a	Коэффициент фильтрации, см/с

τ , МПа



σ , МПа

Вертикальная нагрузка σ , кгс/см ² (МПа)	Сдвигающее усилие τ , кгс/см ² (МПа)	Влажность, %	Коэффициент сдвига	$\tan \phi$	ϕ	c , кгс/см ² (МПа)

Таблица определений физико-механических свойств горных пород	Старший лаборант	
	Руководитель лаборатории	

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Сводная таблица результатов вычисления показателей свойств горных пород с помощью ЭВМ

24 ФЕВРАЛЯ 1988 ОПЕРАТОР ИВАНОВА #RG101 #RG101
 ВРЕМЯ 17 34 SYSOUT=A #RG101 #RG101
 ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. Г. В. ПЛЕХАНОВА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР, ЕС-1035.

```

///RG101 JOB 08, ХРОМЫХ ,
// MSGLEVEL=(2,0),
// MSGCLASS=J,CLASS=0
// EXEC FORTGCLC,PARM,FORT=SOURCE,C=J,Q=300
//FORT,SYSLN DD DSN=LGI,MAIN(XP08RG01),DISP=SHR
*** DD DSN=LGI,MAIN(XP08RG13),DISP=SHR
*** DD DSN=LGI,MAIN(XP08RG10),DISP=SHR
*** DD DSN=LGI,MAIN(XP08RG05),DISP=SHR
*** DD DSN=LGI,MAIN(XP08RG06),DISP=SHR
IEFI421 - STEP WAS EXECUTED = COND CODE 0000
IEF3731 STEP /FORT / START 88055,1704
IEF3741 STEP /FORT / STOP 88055,1705 DPU 0MIN 06,37SEC MAIN 94K
IEFI421 - STEP WAS EXECUTED = COND CODE 0000
IEF3731 STEP /LKED / START 88055,1705
IEF3741 STEP /LKED / STOP 88055,1707 CPU 0MIN 04,30SEC MAIN 180K
//CO,SYSLN DD DSN=LGI,MAIN(XP08RG04),DISP=SHR,LABEL=(,,IN)

```

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

0,12	0,11	0,74	0,35	0,33	0,29	0,47	0,01	0,51	0,12
0,32	0,28	0,29	0,28	0,35	0,12	0,38	0,36	0,56	0,67
0,41	0,44	0,26	0,52	0,32	0,50	0,31	0,78	0,51	0,36
0,24	0,57	0,29	0,17	0,35	0,38	0,32	0,30	0,50	0,28

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

N	XMIN	XMAX	СРЕДНЕЕ	СТАНДАРТ	ДИСПЕРСИЯ	У	СМ. СТАНД
40	0,0100	0,7800	0,3567	0,1664	0,0277	0,4666	0,1664

ОШИБКА	CP	ОШИБКА	S	A	ОШИБКА	A	A/AM	E	ОШИБКА	E	E/EM
0,0263		0,0106		0,4837		0,3873	1,2489	0,2180		0,7746	0,2815

24 ФЕВРАЛЯ 1988 ОПЕРАТОР #RG102 #RG102
 ВРЕМЯ 18.42 SYSOUT=A #RG102 #RG102
 ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. Г.В. ПЛЕХАНОВА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР, ЕС-1055.

```
// RCI02 JOB 08, XPOMBIX ,
// MSGLEVEL=(2,0),
// MSGCLASS=J,CLASS=0
// EXEC FORTGCLG,PARM,FORT=SOURCE,C=J,Q=300
// FORT,SYSLN DD DSN=LGI,MAIN(XD08RG02),DISP=SHR
***          DD DSN=LGI,MAIN(XD08RG13),DISP=SHR
***          DD DSN=LGI,MAIN(XD08RG10),DISP=SHR
***          DD DSN=LGI,MAIN(XD08RG05),DISP=SHR
***          DD DSN=LGI,MAIN(XD08RG06),DISP=SHR
IEF142I - STEP WAS EXECUTED - COND CODE 0000
IEF373I STEP /FORT / START 08055,1834
IEF374I STEP /FORT / STOP 08055,1835 CPU 0MIN 07,07SEC MAIN 98K
IEF142I - STEP WAS EXECUTED - COND CODE 0000
IEF373I STEP /LKED / START 08055,1835
IEF374I STEP /LKED / STOP 08055,1837 CPU 0MIN 03,58SEC MAIN 180K
//GD,SYSLN DD DSN=LGI,MAIN(XD08RG0),DISP=SHR, LABEL=(.,,IN)
```

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ ПОРОД В СРЕЗНЫХ ПРИБОРАХ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ, КГС/КВ.СМ

2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000

СДВИГАЮЩИЕ НАГРУЗКИ, КГС/КВ.СМ

1,186	1,118	1,180	1,069	1,460	1,356	1,036	1,002	1,318	0,720	
0,938	1,122	1,044	1,060	1,148	1,780	1,900	1,490	1,550	2,276	
1,896	1,630	1,580	2,010	1,150	1,560	1,652	1,560	1,692	1,700	
2,600	2,580	1,800	2,450	3,040	2,480	2,130	1,974	2,736	1,480	
2,240	2,230	2,220	2,300	2,550						

НОРМАТИВНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

N	TN	CN	TR	CR	R	TLT	TLR
45	0,30	0,51	0,26	0,31	0,87	1,76	11,58

ОБОЗНАЧЕНИЯ В ТАБЛИЦЕ:

N - КОЛИЧЕСТВО ИСПЫТАНИЙ

TN - НОРМАТИВНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА ВН. ТРЕНИЯ

CN - НОРМАТИВНОЕ ЗНАЧЕНИЕ СЦЕПЛЕНИЯ, КГС/КВ.СМ

TR - РАСЧЕТНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА ВН. ТРЕНИЯ

CR - РАСЧЕТНОЕ ЗНАЧЕНИЕ СЦЕПЛЕНИЯ, КГС/КВ.СМ

R - КОЭФФИЦИЕНТ КОРРЕЛЯЦИИ

TLT - ТАБЛИЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ КРИТЕРИЯ СТЬЮДЕНТА

TLR - РАСЧЕТНОЕ ЗНАЧЕНИЕ КРИТЕРИЯ СТЬЮДЕНТА

- Барон Л. И., Логунцов Б. М., Позин Е. З. Определение свойств горных пород. М., Гос. научн.-техн. изд-во лит. по горному делу, 1962.
- Бугров А. К., Нарбут Р. М., Сипидин В. П. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. Л., Стройиздат, 1987.
- Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. Л., Стройиздат, 1973.
- Грунтоведение/Е. М. Сергеев, Г. А. Голодковская, Р. С. Зиянгиров и др. М., Изд-во МГУ, 1973.
- ГОСТ 12071—84. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. М., Стройиздат, 1985.
- ГОСТ 12248—78. Грунты. Методы лабораторного определения сопротивления срезу. М., Стройиздат, 1982.
- ГОСТ 12536—79. Грунты. Методы лабораторного определения зернового (гранулометрического) состава. М., Стройиздат, 1979.
- ГОСТ 20522—75. Грунты. Метод статистической обработки результатов определения характеристик. М., Стройиздат, 1987.
- ГОСТ 22733—77. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. М., Стройиздат, 1986.
- ГОСТ 23161—78. Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности. М., Стройиздат, 1978.
- ГОСТ 23740—79. Грунты. Методы лабораторного определения содержания органических веществ. М., Стройиздат, 1979.
- ГОСТ 24143—80. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик набухания и усадки. М., Стройиздат, 1980.
- ГОСТ 25100—82. Грунты. Классификация. М., Стройиздат, 1982.
- ГОСТ 25584—83. Грунты. Метод лабораторного определения коэффициента фильтрации. М., Стройиздат, 1983.
- ГОСТ 26447—85. Породы горные. Метод определения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии. М., Стройиздат, 1985.
- ГОСТ 26518—85. Грунты. Метод лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости при трехосном сжатии. М., Стройиздат, 1985.
- ГОСТ 5180—84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М., Стройиздат, 1986.
- Защук И. В. Электроника и акустические методы испытания строительных материалов. М., Высшая школа, 1968.
- Койфман М. И., Ильницкая Е. И. Прочность горных пород в объемном напряженном состоянии. М., Наука, 1964.
- Коломенский Н. В. Общая методика инженерно-геологических исследований. М., Недра, 1968.
- Ломтадзе В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. Л., Недра, 1972.
- Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. Л., Недра, 1984.
- Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов/С. С. Вялов, С. Э. Городецкий, В. Ф. Ермаков и др. М., Наука, 1966.
- Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Т. 1, 2. М., Недра, 1984.
- Методы определения прочности глинистых пород/Под ред. Г. К. Бондарика. М., Недра, 1974.
- Разоренов В. Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М., Стройиздат, 1980.
- Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М., Недра, 1984.

Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород/А. И. Савич, В. И. Коптев, В. Н. Никитин, З. Г. Ященко. М., Недра, 1969.

Силиева О. И. Исследования с помощью ультразвука скоростей распространения упругих волн и упругих параметров в образцах горных пород при одностороннем давлении. М., Изд-во АН СССР, 1962.

Сипидин В. П., Сидоров Н. Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. М., Госстройиздат, 1963.

Справочник по инженерной геологии/Под ред. М. В. Чуринова. М., Недра, 1974.

Турчанинов И. А., Медведев Р. В., Пагин В. И. Современные методы комплексного определения физических свойств горных пород. Л., Недра, 1967.

Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М., Недра, 1975.

Предисловие	3
Глава I. Общие положения	5
§ 1. Понятия о физико-механических свойствах горных пород	—
§ 2. Инженерно-геологическая классификация горных пород	6
§ 3. О некоторых особенностях изучения физико-механических свойств горных пород	7
§ 4. Отбор проб пород для изучения их вещественного состава, строения и физико-механических свойств	18
§ 5. Схема последовательности лабораторного изучения вещественного состава, строения и физико-механических свойств горных пород	21
§ 6. Общие указания о выполнении лабораторных исследований состава, строения и физико-механических свойств горных пород	28
Контрольные вопросы	30
Глава II. Исследование вещественного состава и строения горных пород	31
§ 1. Общие положения	—
§ 2. Макроскопическое изучение и описание горных пород	—
§ 3. Микроскопическое изучение горных пород в шлифах	32
§ 4. Определение гранулометрического состава песчаных и глинистых пород	34
Подготовка пород к гранулометрическому анализу	37
Ситовой метод	38
Метод А. Н. Сабанина	42
Пипеточный метод	47
Метод анализа засоленных пород	53
Комбинированный метод	56
Визуальный метод	59
Ареометрический метод	60
Графические способы изображения гранулометрического состава пород	68
§ 5. Изучение минерального состава песчаных и глинистых пород	75
Иммерсионный метод	—
Метод окрашивания	77
Термический анализ	82
Электронно-микроскопический метод	85
Структурный анализ (рентгенографический и электронографический)	89
§ 6. Изучение минерального состава карбонатных пород	90
§ 7. Определение карбонатности карбонатно-глинистых и глинистых пород	93
§ 8. Определение содержания и состава водорастворимых солей в глинистых породах	96

§ 9. Определение содержания органического вещества в песчано-глинистых породах	97
§ 10. Определение емкости поглощения и состава обменных ионов в глинистых породах	99
Контрольные вопросы	102
Глава III. Исследование физических свойств горных пород	104
§ 1. Основные показатели физических свойств горных пород	—
§ 2. Плотность минеральной части горных пород	—
§ 3. Плотность горных пород	110
Метод непосредственных измерений	—
Метод режущего кольца	111
Метод гидростатического взвешивания	112
Определение плотности скальных и полускальных горных пород с помощью денситометра	115
Определение плотности песков при рыхлом и плотном сложении	116
§ 4. Определение пористости горных пород	119
Метод расчета	—
Метод насыщения	121
§ 5. Определение влажности горных пород	123
Общая влажность	—
Гигроскопическая влажность	125
Максимальная гигроскопическая влажность	126
§ 6. Определение пределов пластичности глинистых пород	127
Предел текучести	—
Предел пластичности	133
Число пластичности	—
§ 7. Относительная плотность песков	134
§ 8. Оптимальная влажность и максимальная плотность песчаных и глинистых пород	135
Контрольные вопросы	138
Глава IV. Исследование водных свойств горных пород	139
§ 1. Основные показатели водных свойств горных пород	—
§ 2. Скорость размокания глинистых пород	—
§ 3. Размягчаемость скальных и полускальных горных пород	144
§ 4. Величина и влажность набухания глинистых пород	—
§ 5. Величина и влажность усадки глинистых пород	147
§ 6. Полная влагоемкость (водоемкость) горных пород	148
§ 7. Водопоглощение и водонасыщение скальных и полускальных горных пород	—
§ 8. Максимальная молекулярная влагоемкость	150
Глинистые породы	—
Пески	151
§ 9. Водоотдача песков и других рыхлых обломочных пород	153
§ 10. Высота капиллярного поднятия воды в песках	—
Метод непосредственных наблюдений	—
Метод капилляриметра	154
§ 11. Определение водопроницаемости горных пород	156
Прибор Г. Н. Камenskого	158
Прибор Г. Тиме	162
Прибор Д. Капещкого	165
Трубка Г. Н. Камenskого	167
Трубка СПЕЦГЕО	172
Компрессионно-фильтрационный прибор	177
Прибор ПВ	184
Прибор Ю. М. Абелева и А. Н. Озерцовского	187

§ 12. Определение коэффициента фильтрации песков по данным их гранулометрического состава и пористости	190
§ 13. Определение коэффициента фильтрации глинистых пород по времени, необходимому для уплотнения их заданной нагрузкой	191
§ 14. Определение коэффициента проницаемости горных пород	195
Контрольные вопросы	197

Глава V. Исследование механических свойств горных пород 199

§ 1. Основные показатели механических свойств горных пород	—
§ 2. Модуль упругости, модуль общей деформации и коэффициент поперечной деформации скальных, полускальных и глинистых пород по данным метода одноосного сжатия	201
§ 3. Упругие характеристики скальных и полускальных горных пород по данным динамических методов	216
§ 4. Коэффициент бокового давления горных пород	223
Метод расчета	—
Метод трехосного сжатия	224
§ 5. Коэффициент сжимаемости и коэффициент относительной сжимаемости песчаных и глинистых пород	227
Компрессионные испытания пород естественного сложения	—
Компрессионные испытания пород нарушенного сложения	242
§ 6. Модуль общей деформации песчаных и глинистых пород по данным компрессионных испытаний	243
§ 7. Просадочность лёссовых пород по данным компрессионных испытаний	244
§ 8. Сила набухания глинистых пород при увлажнении	247
§ 9. Прочность скальных, полускальных и глинистых пород	248
Метод временного сопротивления сжатию	—
Метод соосных пуансонов	251
Метод временного сопротивления растяжению	253
Метод раскалывания	255
Метод скалывания	257
§ 10. Прочность песчаных и глинистых пород	260
Метод испытания пород в срезных приборах	—
Метод Н. Н. Маслова	275
Метод А. А. Ничипоровича	276
§ 11. Определение прочности горных пород в приборах трехосного сжатия	277
§ 12. Условное сопротивление сдвигу песчаных и глинистых пород	290
§ 13. Определение угла внутреннего трения песков по углу естественного откоса	292
Контрольные вопросы	294

Глава VI. Методика статистической обработки результатов лабораторных определений физико-механических свойств горных пород 296

§ 1. Общие понятия	—
§ 2. Нормальное распределение показателей физико-механических свойств горных пород	297
§ 3. Основные статистические характеристики физико-механических свойств горных пород	301
§ 4. Порядок статистической обработки результатов лабораторных определений физико-механических свойств горных пород	304
§ 5. Использование вероятностного трафарета при статистической обработке результатов исследований	306
§ 6. Установление расчетных показателей	309
§ 7. Использование ЭВМ при статистической обработке результатов исследований	312
Контрольные вопросы	313

Приложения	1. Инструкция по тарировке арсометра	314
	2. Таблица температурных поправок (ТП) по Пуазейлю	316
	3. Сводная ведомость определений физико-механических свойств горных пород	317
	4. Сводная таблица результатов вычисления показателей свойств горных пород с помощью ЭВМ	320
Список литературы		323

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Ломтадзе Валерий Давидович

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. МЕТОДЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-е издание, переработанное и дополненное

Редактор издательства Л. Г. Е р м о л а е в а
Технический редактор С. А. К о д а ш
Корректоры О. Г. П о п о в а, Е. А. С т е р л и н а

ИБ 8073

Сдано в набор 26.05.89. Подписано в печать 31.11.89. М-37866. Формат 60×90/16. Бумага книж.-журн. имп. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 20,5. Усл. кр.-отг. 20,75. Уч.-изд. л. 21,05. Тираж 5770 экз. Заказ № 1087/848. Цена 1 руб.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра». Ленинградское отделение, 193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 18.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгения Соколовой Государственного комитета СССР по печати. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.

Стратиграфические схемы четвертичной системы (антропогена) для различных

Основные стратиграфические подразделения			Европейская часть СССР (Северо-Запад, Прибалтика, север Белоруссии)		
Система	Отдел, раздел	Эпоха	Надгоризонты и горизонты	Абсолютная дата, тыс. лет	Похолодание (ледниковье), потепление (межледниковье)
Четвертичная (антропогенная) Q	Голоцен	Современное Q _{IV}	Современный	10	
	Плейстоцен	Верхнее Q _{III}	Валдайский		
				24	
				50	
			Валдайский	70–90	
			Микиулинский	120–170	
		Среднее Q _{II}	Среднерусский		
			Днепровский	300	
			Лихвинский		
		Нижнее Q _I	Окский		
			Вильнюсский		

Заштрихованные интервалы — похолодания (ледниковья),

регионов СССР и Западной Европы ([Лазуков Г.И. и др., 1981] , с упрощениями)

Каспийское море и Прикаспийская низменность	Западная Сибирь и Северный Ледовитый океан		Восточная Сибирь	Альпы, Западная Европа	
Слои (горизонты, ярусы)	Надгоризонты и горизонты		Надгоризонты и горизонты	Надгоризонты и горизонты	
Новокаспийский	Современный		Современный	Голоцен	
Хвалынский (трансгрессия)	Зырянский	Сартанский	Сартанский	Вюрм	
		Каргинский	Каргинский		
Регрессия, перерыв		Зырянский	Зырянский		
Верхнехазарский (трансгрессия)	Казанцевский		Казанцевский	Рисс-вюрм	
Регрессия, перерыв	Бахтинский	Тазовский	Регрессия	Самаровский	Рисс
Нижнехазарский (трансгрессия)		Ширинский	Трансгрессия		
		Самаровский			
		Тобольский			
Регрессия, перерыв		Демьянский			
Бакинский (трансгрессия)	Долединковый		Гюнц-миндель		

незаштрихованные — потепления (межледниковья).

ОБЩАЯ СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ ШКАЛА ФАНЕРОЗОЯ

Эратема	Система	Отдел	Ярус				
КАЙНОЗОЙСКАЯ KZ	Четвертичная Q						
	Неогеновая N	Плиоцен N ₂	Куяльницкий	N ₂ kl	Астийский	N ₂ as	
			Киммерийский	N ₂ k		Плезанский	N ₂ pl
			Понтический	N ₂ p			
		Миоцен N ₁	Мэотический	N ₁ m	Мессинский		N ₁ ms
			Сарматский	N ₁ sr			
			Тортонский	N ₁ t			
			Гельветский	N ₁ h			
			Бурдигальский	N ₁ b			
			Аквитанский	N ₁ a			
	Палеогеновая P	Олигоцен P ₃	Хаттский	P ₃ h	Моитский	P ₁ mn	
			Стамбийский	P ₃ s			
		Эоцен P ₂	Приабонский	P ₂ p			
			Бартонский	P ₂ b			
			Лютетский	P ₂ l			
			Ипрский	P ₂ i			
		Палеоцен P ₁	Танетский	P ₁ t			
			Датский	P ₁ d			
МЕЗОЗОЙСКАЯ MZ		Меловая K	Верхний K ₂	Маастрихтский			K ₂ m
	Кампанский			K ₂ km			
	Сантонский			K ₂ st			
	Коньякский			K ₂ k			
	Туронский			K ₂ t			
	Сеноманский			K ₂ s			
	Нижний K ₁		Альбский	K ₁ al			
			Аптский	K ₁ a			
			Барремский	K ₁ br			
			Готеривский	K ₁ g			
	Юрская J	Верхний J ₃	Валанжинский	K ₁ v	Волжский	J ₃ v	
			Берриасский	K ₁ b			
			Титонский	J ₃ tl			
			Кимериджский	J ₃ kp			
		Средний J ₂	Оксфордский	J ₃ o			
			Келловейский	J ₃ k			
			Батский	J ₂ bt			
		Нижний J ₁	Байосский	J ₂ b			
Ааленский			J ₂ a				
Тоарский			J ₁ t				
Триасовая T	Верхний T ₃	Плинсбахский	J ₁ p				
		Синемюрский	J ₁ s				
		Геттангский	J ₁ h				
		Норийский	T ₃ n				
		Карнийский	T ₃ k				

Эратема	Система	Отдел	Ярус			
ПАЛЕОЗОЙСКАЯ РЗ	Триасовая Т	Средний Т ₂	Ладинский	Т ₂ l		
			Анизийский	Т ₂ a		
		Нижний Т ₁	Оленёкский	Т ₁ o		
			Индский	Т ₁ i		
	Пермская Р	Верхний Р ₂	Татарский	Р ₂ t		
			Казанский	Р ₂ kz		
			Уфимский	Р ₂ u		
		Нижний Р ₁	Кунгурский	Р ₁ k		
			Артинский	Р ₁ ar		
			Сакмарский	Р ₁ s		
			Ассельский	Р ₁ a		
	Каменно-угольная С	Верхний С ₃	Гжельский	С ₃ g		
			Касимовский	С ₃ k		
		Средний С ₂	Московский	С ₂ m		
			Башкирский	С ₂ b		
		Нижний С ₁	Серпуховский	С ₁ s		
			Визейский	С ₁ v		
	Девонская D		Турнейский	С ₁ t		
		Верхний D ₃	Фаменский	D ₃ fm		
			Франский	D ₃ f		
		Средний D ₂	Живетский	D ₂ zv		
			Эйфельский	D ₂ ef		
		Нижний D ₁	Эмский	D ₁ e		
			Зигенский	D ₁ zg		
	Силурийская S	Верхний S ₂	Жединский	D ₁ z		
		Нижний S ₁	Пржидольский	S ₂ p		
			Пудловский	S ₂ ld		
	Ордовик – ская O	Верхний O ₃	Веиллохский	S ₁ w		
			Лландоверийский	S ₁ l		
		Средний O ₂	Ашгиллский	O ₃ as		
			Карадокский	O ₂ k		
		Нижний O ₁	Лландейлский	O ₂ ld		
			Лланвирнский	O ₂ l		
	Кембрийская €	Верхний € ₃	Аренгский	O ₁ a		
			Тремадокский	O ₁ t		
		Средний € ₂	Аксайский	€ ₃ ak		
			Сакский	€ ₃ s		
			Аюсокканский	€ ₃ as		
		Нижний € ₁	Майский	€ ₂ m	Ленский	€ ₁ l
			Амгиинский	€ ₂ am		
			Тойоиский	€ ₁ th		
			Ботомский	€ ₁ b		
			Атдабанский	€ ₁ at	Алданский	€ ₁ a
			Гоммотский	€ ₁ t		