

85 коп.



Е.Г. Чаповский ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Е.Г. Чаповский

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

скан  Grey Coyote
greusoyote13@gmail.com
АР Крым, 2010 г.

Е. Г. Чаповский

**ИНЖЕНЕРНАЯ
ГЕОЛОГИЯ**

**Основы инженерно-
геологического
изучения горных
пород**

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов геологических специальностей вузов



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1975

Евгений Григорьевич Чаповский

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯОсновы инженерно-геологического
изучения горных пород

Редактор И. М. Шагирова. Художник С. В. Митурич. Художественный редактор Т. А. Коленкова. Технический редактор Э. В. Нуждыва. Корректор Г. И. Кострикова.

Т-02578. Сдано в набор 24/VI-74 г. Подп. к печати 4/IV-75 г. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типогр. № 2. Объем 18,5 печ. л.+0,24 п. л. вкл. Усл. п. л. 18,74. Уч.-изд. л. 21,11. Изд. № STD-106. Тираж 19.000 экз. Цена 85 коп.

План выпуска литературы издательства «Высшая школа» для вузов и техникумов на 1975 г. Позиция № 130. Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14. Издательство «Высшая школа».

Великолукская городская типография управления издательств, полиграфии и книжной торговли Псковского облисполкома, г. Великие Луки, Половская, 13. Зак. 2544

Чаповский Е. Г.

Ч19 Инженерная геология (Основы инженерно-геологического изучения горных пород). Учеб. пособие для студентов геолог. спец. вузов. М., «Высш. школа», 1975.

296 с. с ил.

В книге изложены теоретические основы инженерно-геологического изучения горных пород как оснований и среды для возведения различных инженерных сооружений.

Кроме студентов, обучающихся по специальности «Гидрогеология и инженерная геология», она может быть полезна также специалистам, работающим по инженерной геологии и гидрогеологии в проектно-исследовательских и геологоразведочных организациях.

Ч 20806—258
001(01)—75 130—75

6С1

Настоящее пособие написано по программе курса «Инженерная геология», часть I — Грунтоведение (Основы инженерно-геологического изучения горных пород) для специальности «Гидрогеология и инженерная геология» применительно к учебному плану и программе этого курса, утвержденным Министерством высшего и среднего специального образования СССР.

Автор в течение многих лет читал этот курс в Московском ордена Трудового Красного Знамени геологоразведочном институте им. С. Орджоникидзе и при написании настоящего пособия старался учесть опыт и особенности преподавания курса для будущих специалистов по гидрогеологии и инженерной геологии.

В пособии излагаются теоретические основы инженерно-геологического изучения горных пород. Вопросы методики изучения физико-механических свойств горных пород рассматриваются очень кратко, так как эта часть курса по учебным планам и программе выделена в самостоятельный раздел — «Методы лабораторных исследований горных пород в инженерно-геологических целях», по которому автором составлено специальное учебное пособие «Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов». Полевые методы подробно изучаются в пятой части курса «Инженерная геология».

Автор приносит глубокую благодарность проф. Н. В. Коломенскому, проф. Г. С. Золотареву, доцентам Н. С. Шебалиной, Н. А. Исаевой, С. Г. Дубейковскому за ценные советы, замечания и пожелания, которые были учтены автором при подготовке книги к изданию.

Все замечания и пожелания по настоящей книге просьба направлять в адрес кафедры инженерной геологии Московского ордена Трудового Красного Знамени геологоразведочного института им. С. Орджоникидзе.

ВВЕДЕНИЕ

Предмет, задачи грунтоведения и его подразделения

Грунтоведение является одной из составных частей инженерной геологии.

Инженерная геология изучает широкий круг геологических вопросов, связанных с оценкой природных условий строительства различных сооружений, производства горных работ при разработке месторождений полезных ископаемых и прогнозом тех явлений, которые могут возникнуть под воздействием сооружений и горных работ. Задачей инженерной геологии является также рекомендация мероприятий, обеспечивающих устойчивость сооружений и земляных масс.

Основоположник инженерной геологии акад. Ф. П. Саваренский (1937, 1939) дал такое определение этой науки: «Инженерная геология является отраслью геологии, трактующей вопросы приложения геологии к инженерному делу». «Задача инженерной геологии — изучить геологические процессы и физико-технические свойства горных пород, определяющих условия возведения сооружений и направление инженерно-геологических мероприятий по обеспечению устойчивости земляных масс».

Действующим учебным планом и программой по курсу «Инженерная геология» в Московском геологоразведочном институте эта дисциплина разделяется на шесть частей.

Часть 1. Основы инженерно-геологического изучения горных пород (общее грунтоведение). Имеет целью изучение состава, строения и свойств горных пород в зависимости от их генезиса для наиболее рационального использования их при различных видах строительства.

Часть 2. Инженерно-геологическая характеристика генетических типов и комплексов пород (генетическое грунтоведение). Она основывается на сведениях первой части курса, изучает состав и свойства различных генетических типов пород.

Часть 3. Методы лабораторного исследования горных пород в инженерно-геологических целях. Эта часть рассчитана на изучение студентами главнейших методов лабораторного исследования горных пород.

Часть 4. Инженерно-геологическое изучение и оценка геологической обстановки, физико-геологических явлений и инженерно-геоло-

гических процессов. Она посвящается изучению и оценке геологических условий, физико-геологических процессов, влияющих на устойчивость и долговечность сооружений, а также изучению и прогнозированию инженерно-геологических процессов, возникающих в результате инженерной деятельности человека.

Часть 5. Методы полевых инженерно-геологических исследований. В этой части курса изучаются методы полевых инженерно-геологических исследований применительно к различным видам строительства.

Часть 6. Региональная инженерная геология СССР. В этой части рассматриваются инженерно-геологические условия различных видов строительства на территории СССР.

Свое название грунтоведение получило от слова «грунт» (от нем. *der grund* — основа).

Как известно, почвы и горные породы используются в качестве оснований фундаментов инженерных сооружений, как среда, в которой возводятся различные сооружения (туннели, шахты, выемки и др.), и как строительные материалы для возведения сооружений. Таким образом, под *грунтами следует понимать почвы и горные породы, изучаемые как основания, как среда или как естественные строительные материалы для различных сооружений.*

Предметом изучения грунтоведения является исследование горных пород и почв как объектов инженерно-строительной деятельности человека, т. е. изучение свойств горных пород, определяющих их поведение под воздействием инженерных сооружений. Эти свойства принято называть *физико-механическими*. Важнейшими из этих свойств являются прочность, деформируемость и изменчивость их во времени под воздействием инженерных сооружений и природной обстановки.

Как известно, любой материал характеризуется определенным пределом прочности, т. е. предельным сопротивлением внешним нагрузкам. При превышении величины этого предела материал теряет прочность, деформируется, разрушается. Горные породы, как и другие материалы, под влиянием внешней нагрузки деформируются, а при нагрузке, превышающей предел прочности, разрушаются. Вместе с ними деформируются, а в некоторых случаях и разрушаются, и сооружения, воздвигнутые на таких породах.

Некоторые породы характеризуются большой неоднородностью и чрезвычайной изменчивостью своих свойств. Например, глины могут обладать свойствами твердого тела, а по мере увеличения влажности приобретают свойства мягкого — пластичного и даже жидкого — текучего тела. Кроме того, свойства пород в отдельных небольших образцах часто резко отличаются от свойств той же породы в естественных условиях залегания — в массиве. Эти особенности весьма усложняют изучение свойств пород. Если изучение свойств металлов, дерева и различных искусственных строительных материалов представляет в настоящее время относительно простую задачу, то изучение горных пород, изучение инженерно-геологических свойств их представляют весьма сложную задачу, требующую

большого объема *комплексных полевых и лабораторных исследований*. Причем эти исследования не всегда дают однозначное решение, не всегда дают точные данные.

Важнейшими задачами грунтоведения являются следующие:

1. Определение показателей свойств и состояния пород для их классификации и выделения по ним на изучаемых участках типов пород с одинаковыми физико-механическими свойствами, т. е. типизация пород.

2. Определение количественных показателей прочности и других физико-механических свойств пород для использования их при проектировании различных инженерных сооружений.

3. Составление прогнозов возможных изменений свойств пород под воздействием проектируемого сооружения и оценка опасности этого изменения для устойчивости проектируемого сооружения.

4. Разработка теоретических основ и методов улучшения физико-механических свойств пород для обеспечения наиболее рациональных способов строительных работ по возведению сооружений, обеспечения их долговечности и нормальной работы на весь расчетный период эксплуатации.

5. Региональное изучение физико-механических свойств различных генетических и петрографических типов пород страны, в первую очередь районов крупного строительства и перспективных для хозяйственного освоения.

В соответствии с перечисленными задачами в грунтоведении обычно выделяли три основных раздела: общее, региональное и мелиоративное грунтоведение.

Общее грунтоведение занимается изучением общих закономерностей генезиса, состава и физико-механических свойств горных пород и разрабатывает методы исследования состава и свойств пород.

Общее грунтоведение детально изучает зависимость свойств пород от их состава и строения. Большое значение имеет изучение микроструктуры пород, их коллоидной части, а также взаимодействие воды и газов с твердыми минеральными частицами породы. Общее грунтоведение является теоретической основой для всех остальных разделов грунтоведения.

Региональное грунтоведение изучает состав, строение, свойства и пространственное размещение на территории СССР основных генетических типов и стратиграфических комплексов пород.

Мелиоративное грунтоведение, или *техническая мелиорация пород*, имеет своей основной задачей разработку теоретических основ и практических методов искусственного изменения свойств пород в сторону повышения их прочности, устойчивости уменьшения трещиноватости, водопроницаемости и прочее применительно к конкретным требованиям проектирования и организации строительства различных сооружений. Этот раздел грунтоведения вооружает строителей методами искусственной переделки природных свойств пород.

Связь грунтоведения с другими науками

Изучение горных пород и почв в строительных целях — большая и ответственная задача. Эту задачу грунтоведение решает в тесной взаимосвязи с другими научными дисциплинами. Так как грунтоведение является составной частью инженерной геологии, оно прежде всего связано с *механикой грунтов*, которая, основываясь на физико-механических свойствах пород, рассматривает распределение напряжений в породах и деформации пород под воздействием сооружений на основе закономерностей, вытекающих из применения к породам законов теоретической и строительной механики.

Грунтоведение связано с *петрографией* и особенно с *петрографией осадочных пород*, занимающейся изучением происхождения, состава и строения осадочных пород.

Данные петрографии и петрографические методы изучения пород используются в грунтоведении при изучении пород как грунтов. В такой же мере грунтоведение связано с *минералогией*. Свойства пород в значительной мере зависят от их минералогического состава, поэтому грунтоведение широко использует данные минералогии о химическом составе, строении и свойствах минералов и методы минералогии для изучения минералогического состава пород, особенно их тонкодисперсной части.

Общее грунтоведение особенно тесно связано с *почвоведением* — наукой о почвах. Грунтоведение использует многие методы, разработанные для изучения состава и состояния почв, использует данные почвоведения при изучении почв как грунтов в дорожном и аэродромном строительстве.

Грунтоведение связано с *мерзлотоведением* — наукой, занимающейся изучением многолетней мерзлоты, изучением физических и динамических процессов, происходящих при промерзании и оттаивании пород, и свойств пород зоны многолетней мерзлоты — криолитозоны. Связь между грунтоведением и мерзлотоведением весьма тесная, так как обе эти дисциплины изучают горные породы и почвы для строительных целей.

Грунтоведение очень близко соприкасается с *гидрогеологией*, изучая влияние различных видов воды на свойства пород.

Исследуя взаимодействие природных водных растворов с тонко-раздробленными минеральными частицами, в результате которого в тонкодисперсных — глинистых — породах образуется связанная вода, оказывающая большое влияние на свойства и состояние глинистых пород, грунтоведение использует данные и методы *физической и коллоидной химии*.

При изучении процессов формирования и изменения свойств пород грунтоведение соприкасается с *геохимией* и особенно тесно с одним из ее разделов — *учением о коре выветривания*. Различные процессы выветривания, протекающие на поверхности Земли, оказывают огромное воздействие на горные породы, коренным образом изменяя их состав и свойства. В такой же мере грунтоведение связано с *динамической геологией*.

Грунтоведение связано также с рядом других отраслей знаний: *физической химией, геоморфологией, исторической геологией, строительной механикой* и др.

Краткие сведения об истории развития грунтоведения

Инженерная геология в целом и ее важнейшая часть — грунтоведение — оформились у нас в Советском Союзе как самостоятельные ветви геологической науки в двадцатых годах текущего века. Возникновение инженерной геологии именно в нашей стране не случайно, оно было обусловлено невиданным в истории человечества ростом производительных сил, колоссальным размахом строительных работ, строительством уникальных инженерных сооружений, государственным планированием строительных работ, необходимостью обеспечения долговечной и нормальной работы сооружений на весь расчетный период их эксплуатации, невиданным до этого времени размахом исследовательских работ по изучению природных условий строительства различных сооружений.

Инженерная геология впитала в себя и многовековой опыт строительных работ и изучения горных пород и почв как оснований инженерных сооружений. Данные, свидетельствующие о том, что при строительстве сооружений еще в XV—XVI вв. русские строители уже учитывали особенности и свойства пород, были получены в наше время при вскрытии фундаментов древних крепостных стен и храмов, в процессе строительства метрополитенов и других сооружений с глубоким заложением фундаментов. Слабые породы в основании фундаментов усиливались путем забивки свай, а на прочных породах фундамент закладывался неглубоко, после съемки разрушенной выветрелой зоны. Фундаменты в таких случаях были меньших размеров в плане.

При строительстве плотин в XVII и XVIII вв., т. е. в период, когда закладывались основы русской промышленности, изучалась водопроницаемость пород оснований плотин и принимались меры по уменьшению фильтрации воды под плотинами путем устройства водонепроницаемых экранов из глинистых пород.

В 1816 г. появилась первая печатная работа, в которой рассматривались вопросы изменения свойств пород применительно к требованиям гидротехнического строительства. Это было «Рассуждение о устройении и укреплении плотин, сочиненное Дмитрием Лачиновым для получения степени магистра физико-математических наук». Д. Лачинов, инженер по специальности, в этой работе впервые рассмотрел свойства глинистых пород и высказал соображения о возможности искусственного изменения природных свойств пород. Несколько позднее появляется ряд работ других русских инженеров, посвященных вопросам изучения горных пород, из которых следует особо отметить работу М. С. Волкова «Об основании каменных зданий», опубликованную в «Журнале путей сообщения». В ней М. С. Волков впервые предлагает классифицировать горные породы для строительных целей.

В шестидесятых годах прошлого столетия были опубликованы работы В. Карловича «Основания и фундаменты», М. Герсеванова «Лекции о морских сооружениях» и др. В этих работах впервые был научно обобщен накопившийся к тому времени опыт строительства в России с учетом свойств пород и других природных особенностей районов строительства.

Характерная особенность периода зарождения инженерной геологии состоит в том, что вопросами изучения пород занимались специалисты строители.

В начале восьмидесятых годов (1882) в России был создан Геологический институт, в состав которого вошли крупнейшие русские геологи А. П. Карпинский, И. В. Мушкетов, В. А. Обручев, А. П. Павлов, Н. Ф. Погребов, Ф. Ю. Левинсон-Лессинг и др. Многие из них, ставшие впоследствии крупнейшими учеными, начали свою геологическую деятельность (В. А. Обручев, И. В. Мушкетов, А. П. Павлов) геологами на изысканиях трасс железных дорог, строительстве железнодорожных мостов и туннелей. Этот период характеризуется тем, что геологи стали изучать горные породы как естественноисторические образования, увязывать их свойства с генезисом, минералогическим составом, условиями залегания и другими геологическими особенностями, в то время как строители больше обращали внимание на вопросы прочности пород вне связи с их происхождением и составом. Большая роль в преодолении этого недостатка в изучении горных пород как грунтов принадлежит академику А. П. Павлову, который объединил естественноисторический и инженерный подход к изучению пород. А. П. Павлов впервые дал представление о грунтах как горных породах, слагающих верхнюю часть земной коры.

Одновременно с геологами большое влияние на формирование грунтоведения оказали ученые-почвоведы П. А. Костычев, Н. М. Сибирцев и В. Р. Вильямс и особенно В. В. Докучаев, который впервые развил учение о почвах как о природных образованиях, развивающихся на породах, свойства которых формируются под непосредственным влиянием естественноисторической обстановки. Докучаевское учение о географической зональности почвенного покрова оказало большое влияние на развитие регионального грунтоведения и учения о зональности грунтовых вод.

Особенно быстро начала развиваться инженерная геология после Великой Октябрьской социалистической революции в связи с бурным ростом производительных сил страны, как уже говорилось, строительством крупных гидроэлектростанций, металлургических комбинатов, железных и шоссейных дорог, строительством шахт и Московского метрополитена.

В 20-х годах в Советском Союзе начались большое дорожное строительство и связанные с ним работы по изучению почвогрунтов как основания и материала для строительства шоссейных и железных дорог. Ряд почвоведов и геологов привлекаются к решению задач, связанных с этим видом строительства. Так зародилась одна из ветвей грунтоведения — *дорожное грунтоведение*. Основополож-

никами дорожного грунтоведения являются профессора П. А. Земятченский, М. М. Филатов, В. В. Охотин и Н. Н. Иванов. Из них особенно следует отметить роль П. А. Земятченского, создавшего в 1930 г. на геологическом факультете Ленинградского университета первую в СССР кафедру грунтоведения, и М. М. Филатова, организовавшего такую же кафедру в 1938 г. в Московском университете. М. М. Филатовым впервые был создан курс «Основы дорожного грунтоведения» (1936), который имел большое значение для разработки теоретических основ грунтоведения и подготовки специалистов грунтоведов. В настоящее время кафедру инженерной геологии и грунтоведения Московского государственного университета возглавляет крупный советский ученый, член-корр. Академии наук СССР, проф. Е. М. Сергеев.



Михаил Михайлович Филатов
(1878—1942)

и в Западной Сибири, гидроэлектростанций на реках Кавказа, а в послевоенные годы — каскада гидроэлектростанций на реках Волге и Каме, канала Волго-Дон им. В. И. Ленина, высотных зданий в Москве и многих других крупнейших строек.

Развитие и формирование инженерной геологии связано с именем академика Ф. П. Саваренского (1881—1946) — основоположника советской инженерной геологии. Ф. П. Саваренский является автором первого учебника инженерной геологии (1937) и организатором первой в мире кафедры инженерной геологии в Московском геологоразведочном институте. В течение многих лет Ф. П. Саваренский руководил научно-исследовательскими работами по инженерной геологии в Академии наук СССР.

Одновременно с изучением почвогрунтов в связи с дорожным строительством широко развивались инженерно-геологические исследования, связанные с проектированием и строительством промышленных и других сооружений. Они способствовали дальнейшей разработке основ инженерной геологии и ее большого раздела — грунтоведения — как самостоятельной отрасли науки о Земле — геологии. В частности, большие работы проводились по изучению инженерно-геологических условий в связи с проектированием и строительством ирригационных сооружений в Закавказье и Средней Азии, строительством Свирьгэс, Днепрогэс им. Ленина, Канала имени Москвы, Московского метрополитена им. В. И. Ленина, Беломорско-Балтийского канала, крупных металлургических и машиностроительных заводов на Украине, Урале

В настоящее время в Академии наук инженерную-геологию возглавляет член-корр. АН СССР Е. М. Сергеев, являющийся председателем Совета по инженерной геологии при Отделении наук о Земле АН СССР.

Весьма значительная роль в развитии инженерной геологии и ее раздела — грунтоведения — принадлежит В. А. Приклонскому (1899—1959), возглавлявшему после Ф. П. Саваренского инженерную геологию в Академии наук СССР и читавшему в течение почти 25 лет курс грунтоведения в Московском геологоразведочном институте. В. А. Приклонский написал первый учебник по грунтоведению для геологоразведочных вузов. В нем изложены основы общего грунтоведения, инженерной мелиорации грунтов и описаны инженерно-геологические свойства основных генетических типов горных пород СССР (генетическое грунтоведение).

Видное место в развитии грунтоведения принадлежит И. В. Попову, руководившему в течение ряда лет кафедрой инженерной геологии Московского геологоразведочного института. В 1941 г. он написал «Основы инженерно-геологического грунтоведения», а в 1960—1965 гг. — учебник «Региональная инженерная геология СССР», в котором дано краткое освещение инженерно-геологических свойств пород территории СССР.

Большой вклад в развитие грунтоведения сделал Н. В. Коломенский, изучавший процессы выветривания с точки зрения влияния их на изменение свойств горных пород. Им написан ряд учебников по инженерной геологии, в которых значительное место уделено вопросам общего грунтоведения. Н. В. Коломенский успешно разрабатывал методологию опробования горных пород.



Федор Петрович Саваренский
(1881—1946)



Виктор Александрович
Приклонский (1899—1959)

Развитие грунтоведения в СССР связано также с именами ученых В. М. Безрука, Б. М. Гуменского, А. М. Дранникова, Н. Я. Денисова, Г. С. Золотарева, И. С. Комарова, Ф. В. Котлова, В. Д. Ломтадзе, А. Н. Ларионова, Е. И. Медкова, С. С. Морозова, Н. В. Орнатского, П. Н. Панюкова и многих других, разрабатывавших и продолжающих разрабатывать отдельные вопросы инженерной геологии.

Наряду с учебными (Московский и Ленинградский государственные университеты, Московский геологоразведочный институт, Ленинградский горный институт, Московский инженерно-строительный институт, Ленинградский и Днепропетровский институты инженеров железнодорожного транспорта и др.) и отраслевыми научно-исследовательскими институтами (Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии, Научно-исследовательский институт оснований и фундаментов и др.) в развитии грунтоведения большую роль играют работы многочисленных проектно-исследовательских и геологических организаций: Гидропроекта, Фундаментпроекта, Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве Госстроя СССР, Второго гидрогеологического управления Министерства геологии СССР и др.

Основные учебники и учебные пособия по грунтоведению

Библиография учебной, научно-методической литературы и монографий по грунтоведению довольно обширна.

В качестве главных учебников и учебных пособий, которые используются в настоящее время в геологоразведочных и горных вузах и на геологических факультетах университетов при подготовке специалистов по инженерной геологии, можно указать следующие.

Е. М. Сергеев, Г. А. Голодковская, Р. С. Зянгиров, В. И. Осипов, В. Т. Трофимов. Грунтоведение. Под ред. Е. М. Сергеева. Изд. 4. М., Изд-во МГУ, 1973. Эта работа является наиболее полным — фундаментальным изложением основ общего грунтоведения применительно к учебным программам государственных университетов. Она утверждена МВ и ССО СССР в качестве учебника для студентов геологических специальностей вузов.

В ней большое внимание обращено на общую характеристику основных типов почв и грунтов. Учебник написан на основе использования новейших данных, полученных авторами и другими исследователями при изучении грунтов. По объему и содержанию этот учебник может также служить пособием для аспирантов и преподавателей.

В. А. Приклонский. Грунтоведение. Ч. 1, изд. 3, 1955; ч. 2, изд. 1, 1952. М., Госгеоллиздат. В первой части изложены основы общего грунтоведения. Освещению основ предпослано описание процессов литогенеза, условий залегания и текстуры горных пород, процессов выветривания, возраста пород и их влияния на физико-механические свойства горных пород. Специальный раздел первой части книги посвящен изложению принципов инженерной мелиорации грунтов. Эта часть работы была утверждена МВ и ССО СССР в качестве учебника для геологоразведочных вузов. Во второй части книги В. А. Приклонского даны систематическое описание главных генетических типов и комплексов горных пород СССР и их инженерно-геологическая характеристика, т. е. региональное грунтоведение. Эта часть работы В. А. Приклонского допущена МВ и ССО СССР в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений.

В. Д. Ломтадзе. Инженерная геология (инженерная петрология). Л., «Недра», 1970. В книге изложены основы инженерно-геологического изучения горных пород. Допущена Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Гидрогеология и инженерная геология». Второе название учебника (инженерная петрология) не является общепризнанным и не отвечает действующей программе курса.

Н. В. Коломенский. Инженерная геология. Ч. 1. М., Госгеолтехиздат, 1951. В этом учебнике изложены кратко основы грунтоведения и описаны методы лабораторного и полевого изучения физико-технических свойств пород. Книга эта утверждена в качестве учебника для геологоразведочных техникумов.

Е. Г. Чаповский. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. Изд. 3. М., «Недра», 1966. В работе изложены методы определения физико-механических свойств рыхлых — песчаных и связных — глинистых пород, определения прочности полускальных и скальных грунтов, а также статистические методы обработки показателей инженерно-геологических свойств пород. Книга допущена Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов геологических специальностей высших учебных заведений.

Нормативные указания по исследованию грунтов для строительства даны в Строительных нормах и правилах Государственного комитета Совета Министров СССР по делам строительства, а методика определения некоторых свойств грунтов — в Государственных стандартах СССР (ГОСТах).

В 1968 г. Издательством Московского университета опубликовано «Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород» под редакцией Е. М. Сергеева, С. Н. Максимова и Г. М. Березкиной. В этой работе в двух томах дано описание всех основных полевых и лабораторных методов изучения горных пород в инженерно-геологических целях.

Гордеев Д. И. Основные этапы истории отечественной гидрогеологии. Тр. Лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР. Т. 7. М., Изд-во АН СССР, 1954.

Ломтадзе В. Д. Инженерная геология (инженерная петрология). Л., «Недра», 1970, гл. I.

Приклонский В. А. Грунтоведение. Ч. I. М., Гостеолтехиздат, 1955, введение.

Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Знангиров Г. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, введение.

Сергеев Е. М. Научное наследство М. М. Филатова. Тр. Совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1956.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Чтобы изучать горные породы и почвы как грунты, надо объединить их в группы, подгруппы и другие подразделения, характеризующиеся определенной общностью, однородностью свойств, генезиса, состава и других признаков, т. е. классифицировать их. Без такой классификации нельзя привести их в систему, установить объективные закономерности в кажущемся беспорядке пород и почв, встречающихся в окружающей нас природе, нельзя целенаправленно, обоснованно решать целый ряд научных и практических задач.

Имеется значительное количество классификаций пород и почв в различных отраслях знаний (почвоведении, петрографии, горном деле и др.), но эти классификации не учитывают тех особенностей горных пород и почв, которые необходимы для инженерно-геологического изучения горных пород и почв как грунтов.

В инженерной геологии также существует и применяется на практике и в научных работах большое количество классификаций пород. По назначению все существующие классификации подразделяются на общие, частные, отраслевые и региональные.

В инженерной геологии — грунтоведении нужна прежде всего общая классификация горных пород и почв, которая рассматривала бы их как грунты, т. е. как объекты инженерно-строительной деятельности человека. Такая общая классификация почв и пород нужна для решения ряда научных и практических задач, а именно:

- 1) выбора правильной методики полевых и лабораторных исследований почв и пород;
- 2) установления необходимого комплекса этих исследований и их объема;
- 3) типизации пород при инженерно-геологической съемке и составлении инженерно-геологических карт и разрезов;
- 4) предварительного суждения об инженерно-геологических свойствах пород на разных стадиях проектирования строительства;
- 5) прогнозирования инженерно-геологических процессов, возникающих под влиянием взаимодействия пород с проектируемым сооружением;
- 6) разработки специальных и отраслевых классификаций;
- 7) для учебных целей при изучении курса инженерной геологии.

Общая классификация. *Общая классификация* предназначается для объединения всех основных почв и горных пород, встречающихся в природе и имеющих значение для инженерно-строительной практики. Она должна основываться на признаках, дающих наиболее полную инженерно-геологическую характеристику почвам и

грунтам. Такими основными признаками являются геологические (возраст, генезис, условия и форма залегания), химико-минералогические (минералогический состав, степень и характер засоления, состав обменных катионов), петрографические (гранулометрический состав, структура, текстура, сцементированность), физическое состояние (степень влажности, выветрелости, степень плотности, трещиноватость и др.), стойкость (способность сопротивляться факторам выветривания и растворения), механическая прочность (способность сопротивляться внешним механическим воздействиям, степень и характер деформируемости под нагрузками).

Однако общепринятой общей инженерно-геологической классификации пород, удовлетворяющей всем требованиям инженерной геологии и строительной практики, нет ни в СССР, ни за рубежом. Было разработано много классификаций пород для инженерно-строительных целей. Одной из первых таких классификаций была классификация А. П. Павлова, который разделил горные породы на группы на основе оценки только сил сцепления и без учета состава пород, их петрографических особенностей и многообразия других свойств. Позднее Ф. П. Саваренский предложил классификацию, в которой учитывались основные физические свойства пород, их отношение к воде и механические свойства. Комбинируя указанные признаки, Ф. П. Саваренский выделил пять основных групп пород.

Группа А. Твердые компактные «скальные» породы, практически несжимаемые. Прочные. К этой группе относятся массивно-кристаллические магматические, метаморфические и прочносцементированные осадочные породы.

Группа В. Относительно твердые и компактные породы, «полускальные». Слабо сжимаемые. Довольно прочные — выветрелые трещиноватые породы группы А, слабосцементированные и растворимые в воде осадочные породы.

Группа С. Мягкие породы, связные пластичные глинистые породы. Практически водонепроницаемые. Прочность зависит от степени увлажнения.

Группа D. Рыхлые несвязные породы, хорошо водопроницаемые — пески, галечники, гравий.

Группа E. Мягкие рыхлые породы особого состава и состояния — «слабые». К этой группе относятся торф, насыпные грунты, илы и др.

Описанные группы пород в классификации Ф. П. Саваренского делятся на классы и подклассы, которым дается подробная инженерно-геологическая характеристика. Недостатком этой классификации является слабый учет генезиса и петрографического состава, а также недостаточная четкость признаков, положенных в основу выделения некоторых подразделений. В дальнейшем В. А. Приклонский несколько переработал и дополнил классификацию Ф. П. Саваренского в направлении большей отчетливости классификационных признаков. Однако и в переработанном виде эта классифика-

ция недостаточно учитывает генезис и петрографический состав пород.

Классификация Ф. П. Саваренского перерабатывалась П. Н. Панюковым, который подразделил породы по силе сцепления и характеру связей между отдельными частицами, по различным петрографическим признакам и важнейшим физико-механическим свойствам. Однако и П. Н. Панюкову не удалось сгруппировать породы с учетом их генезиса. Позже она была несколько изменена и дополнена В. Д. Ломтадзе, который подразделил выделенные Ф. П. Саваренским группы пород на генетические типы и петрографические виды. Но и эта классификация оказалась недостаточно полной.

Е. М. Сергеев предложил в 1948 г. генетическую классификацию, которая также относится к категории общих классификаций. В ней больше, чем в рассмотренных выше классификациях, учитываются геолого-петрографические и генетические признаки пород и почв. В то же время в классификации Е. М. Сергеева недостаточно учитываются механическая прочность и деформируемость — весьма важные в инженерно-геологическом отношении признаки.

В 1957 г. Совещание по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения приняло общую инженерно-геологическую классификацию горных пород и почв, разработанную совместно Е. М. Сергеевым, В. А. Приклонским, П. Н. Панюковым и Л. Д. Белым. Эта классификация положена в основу настоящего курса (см. табл. 1). Все породы и почвы в ней объединены в два основных класса и пять групп, подразделяющихся на 16 подгрупп. Внутри подгрупп выделяются последовательно типы, подтипы и виды. Внутри видов могут быть выделены разновидности. Для выделения разновидностей указаны основные принципы выделения. Разделение на классы произведено по прочности, жесткости связей между минеральными частицами, образующими породу. Объединение большого количества пород и почв разнообразного генезиса и петрографического состава в два класса позволяет дать им правильную инженерно-геологическую оценку по важнейшим показателям. Такими важнейшими показателями для пород первого класса с жесткими кристаллизационными связями служат механическая прочность, крепость и стойкость, а для пород второго класса — степень сжимаемости, консистенция, фильтрационные свойства и сопротивление сдвигу. Выделение групп внутри классов произведено по генезису. В классе с жесткими связями выделены группы магматических, метаморфических и осадочных пород, а в классе пород с отсутствием жестких связей — осадочные породы, почвы и искусственно образованные грунты.

Подгруппы выделяются по петрографическим признакам, которые определяют основной облик породы; в одном случае это будут петрографические особенности, обусловленные генезисом (для групп магматических и метаморфических пород), в другом — наличие сцементированности и связности, особенности генезиса (для групп осадочных пород) и зональности распространения (для почв).

Общая инженерно-геологическая классификация грунтов (Е. М. Сергеев, В. А. Приклонский, П. Н. Панюков и Л. Д. Белый, 1957)

Класс	Группа	Подгруппа	Тип	Подтип	Главнейшие виды	Принципы выделения разновидностей
А. Породы с жесткими связями	I. Магматические	1. Глубинные (интрузивные)	Собственно глубинные	Равномерно-кристаллические, мелко- и среднезернистые порфировидные и крупнокристаллические	Граниты Диориты Сиениты Габбро Дуниты Перидотиты	Разновидности выделяются по степени выветрелости и трещиноватости: а) невыветрелые, нетрещиноватые; б) невыветрелые трещиноватые; в) слабоветрелые скрытотрещиноватые; г) сильноветрелые трещиноватые
		2. Излившиеся (эффузивные)	Палеотипные Кайнотипные	Порфировидные Микро-неполнокристаллические Порфиновые пористые Микро-неполнокристаллические Стекловатые	Диабазы Порфиры Порфириты и др. Трахиты Андезиты Трахит-липариты Пемза и др. Базальты Дациты Обсидиан Слюдяной камень Перлит Гнейсы Мигматиты Эклогиты	
	II. Метаморфические	3. Регионально-метаморфические	Метаморфизованные	Гнейсовидные		Выделение разновидностей производится по тем же признакам, что и у магматических пород
	III. Осадочные	4. Контакт-метаморфические	Слабометаморфизованные	Сланцеватые	Слюдяные, хлоритовые, тальковые, амфиболовые и другие кристаллические сланцы	Разновидности выделяются по трещиноватости и выветрелости (так же, как у магматических и метаморфических пород)
Слоисто-сланцеватые				Кварциты Яшмы Мраморы		
Филлиты				Глинисто-слюдяные, слюдяноглинистые и серицитовые сланцы		
Глинистые сланцы				Глинистые, песчано-глинистые, углисто-глинистые и другие глинистые сланцы		
Сланцеватые Полосчатые				Кристаллические сланцы, роговики, скарны, спилзиты и др.		
Пятнистые и узловатые				Пятнистые и узловатые глинистые сланцы, спилзиты и др.		
	5. Тектониты	Немилонитизированные породы	Сцементированные и несцементированные	Тектонические брекчии и др.		
	6. Обломочные сцементированные	Милонитизированные породы Крупнообломочные	С очень прочным и стойким цементом	Милониты Кремнистые конгломераты, брекчии и туфобрекчии		

Класс	Группа	Подгруппа	Тип	Подтип	Главнейшие виды	Принципы выделения разновидностей
			Мелкозернистые	С прочным и стойким цементом С прочным и нестойким цементом С непрочным и нестойким цементом	Карбонатные и железистые конгломераты, брекчии и туфобрекчии Мергелистые конгломераты, брекчии и туфобрекчии Глинистые, глинисто-гипсовые и глинисто-мергелистые конгломераты, брекчии и туфобрекчии Кремнистые песчаники, туфы, и туффиты Известковистые и железистые песчаники, туфы, и туффиты	
	7. Химические и биохимические (органогенные)		Кремнистые Железистые	С очень прочным и стойким цементом С прочным и стойким цементом С прочным и нестойким цементом	Глинистые и глинисто-гипсовые песчаники, туфы и туффиты Опоки, трепел, диатомиты, радиоляриты, кремнистые туфы Лимонит, боксит	
			Карбонатные	Плотные Неплотные	Известняки, доломиты, доломитизированные известняки, мергелистые известняки, мергели Известняки-ракушечники, мел и мелоподобные породы, доломитовая мука Гипс, ангидрит Галит, сильвинит, сильвин, карналит Аргиллиты, алевролиты, мергелистые глины	
	8. Глинистые и пылеватые		Сульфатные Галоидные Глинистые и пылеватые отвердевшие	Размокаемые, неразмокаемые		
Б. Породы без жестких связей			Глинистые и пылеватые сильноуплотненные Глинистые и пылеватые уплотненные Глинистые и пылеватые неуплотненные	Сильно набухающие, набухающие, слабо набухающие Твердые Скрытопластичные Пластичные Просадочные Скрытотекучие Текучие Просадочные	Глины, суглинки, супеси — Лёссовые породы Глины, суглинки, супеси, илы Лёссовые породы	Разновидности выделяются по особенностям химико-минералогического состава, в частности по засоленности, карбонатности, пиритосодержанию и содержанию органического вещества
	9. Обломочные нецементированные		Крупнообломочные	С заполнителем Без заполнителя	Каменистые и валунные, щебенчатые и галечниковые, хрящеватые и гравийные	Разновидности выделяются по петрографическому составу обломочного материала и заполнителя

Класс	Группа	Подгруппа	Тип	Подтип	Главнейшие виды	Принципы выделения разновидностей
IV. Почвы	10. Зональные		Песчаные	Гравелистые Чистые Пылеватые	Грубозернистые, крупнозернистые, среднезернистые, мелкозернистые, тонкозернистые	Разновидности выделяются по степени плотности
			Тундровые Дерново-подзолистые Болотные			
	11. Интра-зональные	Лесостепные Черноземы Каштановые и бурые Сероземы Латериты Черноземовидные	Полуболотные Собственно болотные Торфяники	Хрящеватые, песчаные, супесчаные, суглинистые, глинистые	Разновидности выделяются в зависимости от петрографического состава (так, как это указано для глинистых и пылеватых уплотненных песчаных и крупнообломочных пород)	
V. Искусственные	12. Культурные слои		Засоленные	Перегнойно-карбонатные Луговые Солонцы Солоди Солончаки Древние Современные	Каменистые, щебенчатые	Выделение разновидностей может быть весьма разнообразным в зависимости от петрографического состава породы и методов воздействия на нее
	13. Наносные	Водохранилища (искусственный аллювий)				
	14. Насыпные	Ирригационные (поливные воды) Строительные, промышленные			Хрящеватые, песчаные Супесчаные Суглинистые, глинистые	
	15. Искусственно улучшенные	Механически уплотненные Электрохимически укрепленные Электроосмотически обезвоженные Засоленные Глинизированные Цементированные Известкованные Силикатированные Битумированные Замороженные Прогретые и обожженные				
	16. Искусственно ухудшенные	Механически разрыхленные Искусственно увлажненные Искусственно выветрелые				

Примечание. При классификации осадочных пород обязательно учитывается их генезис, который указывается в названии породы, например: аллювиальные, глинистые, слабовыветрелые и скрытотрещиноватые конгломераты; озерные сильповыветрелые, трещиноватые мергели; морские уплотненные, скрытопластичные пиритсодержащие глины; золовые мелкозернистые рыхлые пески и т. д. Среди осадочных пород по генетическим типам выделяются: элювиальные, дэлювиальные, аллювиальные, пролювиальные, водноледниковые, озерные, морские, моренные, золовые и другие породы.

Подгруппы разделяются на типы. Типы в группе магматических пород выделяются по петрографическим особенностям, в группе метаморфических пород — по степени метаморфизации, в группе осадочных пород — по химическому составу (для хемогенных пород) и по величине зерен (для терригенных пород); почвы разделяются на типы по генезису, а искусственные грунты — по способу накопления и способу улучшения свойств мелиорированных грунтов. Подтипы в группах магматических и метаморфических пород выделяются по структурным и текстурным особенностям, в группе осадочных пород — по сцементированности и характеру цемента, гранулометрическому составу, степени плотности, отношению к воде и просадочности, в группе почв — по подтипу почв (из классификации почв). Группа искусственных грунтов на подтипы не делится. Главнейшие виды выделяют по петрографическому, химическому и гранулометрическому составу.

Разновидности почв и пород авторы не выделяют, а лишь указывают принципы выделения этих разновидностей для каждой группы.

Все основные подразделения почв и пород авторами рассмотренной классификации охарактеризованы важнейшими инженерно-геологическими показателями (см. табл. 46, 47, 48).

Несмотря на большие достоинства рассмотренной общей инженерно-геологической классификации, она также требует дальнейшей разработки и уточнения в части разделения пород на разновидности и инженерно-геологической характеристики каждой выделенной разновидности.

Специальные, отраслевые и региональные классификации. Специальные классификации пород являются дополнением и развитием общих классификаций. В этих классификациях породы подразделяются по какому-либо одному признаку — по минералогическому или гранулометрическому составу, пластичности, по водопроницаемости, по степени сжимаемости, по плотности и т. д.

К специальным классификациям относятся также классификации грунтов Строительных норм и правил (СНиП II-Б. 1—62): по гранулометрическому составу (см. табл. 8), по степени плотности (см. табл. 21), по числу пластичности (см. табл. 27) и по консистенции (см. табл. 28), а также по степени влажности. Все эти классификации используются при проектировании фундаментов зданий и сооружений.

Отраслевые классификации предназначены для подразделения пород применительно к запросам какого-либо определенного вида строительства — гидротехнического, дорожного, мелиоративного, для использования пород как оснований зданий и сооружений и др.

В качестве примера отраслевой классификации можно привести номенклатуры грунтов, используемых в качестве оснований зданий и сооружений по Строительным нормам и правилам 1962 г. По этой классификации грунты подразделяются на четыре группы: *скальные* — изверженные, метаморфические и осадочные породы с жесткой связью между зернами (спаянные и сцементированные), залегающие в виде сплошного массива или трещиноватого слоя, обра-

зующего подобие сухой кладки; *крупнообломочные* — несцементированные грунты, содержащие более 50% по весу обломков изверженных, метаморфических или сцементированных осадочных пород с размерами частиц более 2 мм в диаметре; *песчаные* — сыпучие в сухом состоянии грунты, не обладающие свойством пластичности, содержащие менее 50% по весу частиц крупнее 2 мм; *глинистые* связные грунты, обладающие пластичностью.

Отраслевыми являются известная классификация М. М. Протодьяконова по коэффициенту крепости пород, используемая в горном деле (см. табл. 42), классификация пород по разрабатываемости, используемая в геологоразведочном деле (см. табл. 43 и др.).

Региональные классификации служат для типизации пород на какой-либо определенной территории. Региональные классификации обычно основываются на возрастных и генетических подразделениях пород, а также на их местных особенностях, определяющих состояние и свойства пород, например степень просадочности в областях развития лёссов и лёссовидных пород, степень закрепленности эоловых песков в пустынных районах и др.

Региональные классификации используются при крупномасштабном инженерно-геологическом картировании.

Контрольные вопросы

1. Как разделяются классификации грунтов?
2. Почему и для каких целей нужна общая инженерно-геологическая классификация грунтов?
3. Основные принципы построения общей классификации.
4. Основные подразделения пород и почв, выделяемые в общей инженерно-геологической классификации, разработанной Е. М. Сергеевым В. А. Приклонским, П. Н. Панюковым и Л. Д. Белым.
5. Назначение специальных, отраслевых и региональных классификаций грунтов. Примеры этих классификаций.

Литература

- Приклонский В. А. *Общие грунтоведение*. М., Госгеолтехиздат, 1955. гл. 5.
- Сергеев Е. М. и др. *Грунтоведение*. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. VIII.
- Сергеев Е. М., Приклонский В. А., Панюков П. Н., Белый Л. Д. *Общая инженерно-геологическая классификация горных пород и почв*. Тр. совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1956.
- Справочник укрупненных норм для проектирования геологоразведочных работ. В. 5. Разведочное бурение. М., Госгеолтехиздат, 1960.
- Строительные нормы и правила. Ч. 2, раздел Б, глава 1. Основания зданий и сооружений (СНиП II-Б.1—62) и раздел М, глава 4 (СНиП II-М.4—62). Подземные горные выработки предприятий по добыче полезных ископаемых. М., Изд-во лит. по строительству и архитектуре и строительным материалам, 1962.

Г Л А В А 2
ПОКАЗАТЕЛИ СОСТАВА, СОСТОЯНИЯ
И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ГОРНЫХ ПОРОД

Характеристики состава, состояния и свойств горных пород выражаются специальными количественными показателями.

Показатели и методы их определения различны и зависят от ряда факторов: 1) характера сооружений; 2) стадии проектирования сооружения; 3) типа пород.

Характер проектируемого сооружения определяет состав показателей свойств и состояния пород, которые необходимо изучить для обоснования проекта этого сооружения. Так, при проектировании каналов и водохранилищ первостепенное значение имеет изучение фильтрационных свойств пород, определяющих их водоудерживающую способность; при проектировании открытой разработки месторождений полезных ископаемых — изучение устойчивости пород для оценки поведения их в бортах карьеров и изучение фильтрационных свойств для расчета возможных водопритоков; при проектировании естественных оснований различных сооружений — изучение показателей прочности и возможных деформаций и т. д. Состав показателей зависит также от характера воздействия проектируемого сооружения на породы.

Так, при передаче на грунт вертикальных нагрузок возникает необходимость изучения главным образом показателей сопротивления пород сжатию и определения возможных осадок, при передаче на грунт горизонтальных усилий — показателей сопротивления сдвигу и т. д.

Очень важно при назначении состава определяемых показателей свойств пород в каждом отдельном случае учитывать все инженерно-геологические явления, которые могут возникнуть при взаимодействии сооружения с породой (фильтрация, суффозия, выщелачивание, просадки, осадки и т. д.), и определять такие показатели, с помощью которых можно было бы дать количественную оценку прогнозируемых явлений и обеспечить инженеру-строителю возможность запроектировать меры борьбы с опасными последствиями этих явлений.

Стадии проектирования определяют характер и степень детальности изучения показателей: на начальных стадиях проектирования (технико-экономический доклад, схематический проект) определяются такие показатели, которые обеспечивают получение общего представления о характере пород и их возможном поведении под сооружениями, дают возможность типизировать породы. Определе-

ние их может выполняться приближенными методами. На более поздних стадиях проектирования (технический проект, рабочие чертежи) повышается точность определений; они выполняются с большей детальностью и на достаточно большом количестве образцов в лаборатории, а также в полевых условиях в массиве породы. Эти исследования должны обеспечивать возможность статистической обработки результатов и получения расчетных значений показателей с большой степенью достоверности.

Наконец, состав показателей зависит от принадлежности изучаемой породы к тому или иному классу, группе и подгруппе. Для класса пород с жесткими связями (в зависимости от характера проектируемого сооружения) важно определить степень выветрелости, трещиноватости, минералогический состав, морозоустойчивость, фильтрационные свойства, прочность на раздавливание.

Для класса пород без жестких связей состав определяемых показателей зависит от принадлежности породы к той или иной подгруппе. Для глинистых пород определение фильтрационных свойств в обычных случаях особого практического значения не имеет, зато большое внимание уделяется изучению влажности, консистенции, сопротивлению сжатию и сдвигу. Если ожидается значительная осадка сооружения, воздвигаемого на глинистой породе, определение коэффициента фильтрации важно с точки зрения оценки возможной длительности процесса консолидации.

Обычно изучаются гранулометрический и минералогический составы пород, их плотность, сложение, степень влажности, фильтрационные свойства и сопротивление сдвигу.

Показатели состава, свойств и состояния горных пород с точки зрения практического использования обычно подразделяются на три основные группы: 1) классификационные показатели, 2) косвенные показатели, 3) прямые показатели.

Классификационные показатели используются для предварительного выделения и сравнения друг с другом типов пород по объективным признакам, присущим этим породам, и для определения площади распространения выделенных типов, т. е. для инженерно-геологического картирования. Они определяются в массовом количестве простыми и быстрыми приемами (визуально или с помощью несложных приспособлений) непосредственно в поле у обнажения, буровой скважины, в шурфе и других выработках или в полевой инженерно-геологической лаборатории.

К классификационным относятся следующие показатели:

Цвет
Минералогический состав
Карбонатность
Наличие органического вещества
Оглеенность
Ожелезненность
Общая засоленность
Выветрелость
Естественная влажность

Текстура
Структура
Консистенция
Пластичность
Размокаемость
Набухаемость
Уплотняемость
Водопроницаемость
Степень влажности
Объемный вес

Косвенные показатели необходимы для вычисления прямых показателей и для приближенной оценки возможного поведения породы при взаимодействии с сооружением на основе определения коррелятивных связей между косвенными и прямыми показателями. Они используются на первых стадиях проектирования. Показатели этой группы определяются в полевых и стационарных инженерно-геологических лабораториях.

В эту группу входят следующие показатели:

Удельный вес	Число пластичности
Объемный вес (естественный)	Максимальная молекулярная влагоемкость
Объемный вес скелета	Максимальная высота капиллярного поднятия
Естественная пористость	Максимальная и минимальная пористость
Естественная влажность	Максимальный и минимальный объемный вес
Гранулометрический состав	
Нижний предел пластичности	
Верхний предел пластичности	

Прямые показатели используются при проектировании для окончательных строительных и других расчетов сооружений. Большинство этих показателей определяют на специальных приборах и аппаратуре в стационарных лабораториях на образцах, отобранных на участке непосредственного расположения сооружения и зоны возможного его влияния.

К прямым показателям относятся:

Естественный объемный вес	Модуль упругости
Объемный вес под водой	Коэффициент Пуассона
Коэффициент компрессии	Коэффициент бокового давления
Модуль компрессии	Временное сопротивление сжатию
Модуль сжатия	Коэффициент и угол внутреннего трения
Модуль общей деформации	Коэффициент и угол сдвига

Ниже в табл. 2, 3 и 4 даны характеристики всем перечисленным группам показателей с указанием класса пород, для которого используется тот или иной показатель, и практического применения его (по В. А. Приклонскому, с дополнениями и изменениями).

Следует отметить, что указанное разделение показателей на группы в значительной мере является условным. Некоторые показатели в зависимости от целевого назначения проводимых инженерно-геологических исследований, стадии проектирования и характера сооружений могут переходить из одной группы в другую. Например, косвенные и прямые показатели при производстве крупномасштабных инженерно-геологических съемок используются для типизации пород по площади, т. е. для классификации пород. В то же время некоторые классификационные показатели (естественная влажность, объемный вес, пределы пластичности, коэффициент влажности, содержание растворимых солей и др.) используются в качестве косвенных показателей или прямых (объемный вес, содержание водорастворимых солей, гранулометрический состав и др.) при различных инженерных расчетах.

Классификационные показатели пород

Состав, свойства, состояние и признаки пород	Показатель	Методы определения	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
			породы с жесткими связями	породы без жестких связей	
				связные глистые	несцементированные рыхлые (песчаные)
Цвет	1. Состав и строение	Визуальный (рекомендуется шкала цветов)	+	+	+
	Название цвета и его оттенки для породы с естественной влажностью				
Текстура и микро-текстура	1. Степень однородности	1. Визуальный	+	+	+
	2. Характер слоистости	2. Просмотр под бинокулярной лупой			
	3. Включения				
Структура	1. Размер и степень однородности зерен	1. Визуальный (рекомендуется специальная эталонная шкала) 2. С помощью полевой инженерно-геологической лаборатории	+	+	+
	2. Форма зерен	Визуальный	+	-	+
	3. Взаимное расположение зерен	1. Визуальный 2. Бинокулярная лупа	+	+	+
	4. Тип цемента	1. Визуальный 2. Просмотр под бинокулярной лупой 3. Специальные методы (подсушивание и размачивание, пропитывание, окрашивание и т. д.)	+	+	-
Карбонатность	1. Наличие известковых стяжений	Визуальный	+	+	+
	2. Количественное определение карбонатов	1. Проба на вскипание с HCl 2. Кальциметром	+	+	+
Примесь органического вещества	1. Цвет (темные тона, черный)	1. Визуальный 2. Проба на растворение в щелочи	+	+	+
	2. Наличие видимых органических остатков	3. Прокаливание Визуальный	+	+	+

Состав, свойства, состояние и признаки пород	Показатель	Методы определения	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
			породы с жесткими связями	породы без жестких связей	
				связные глинистые	несцементированные рыхлые (песчаные)
Засоленность	Наличие кристаллов, выцветов и налетов легкорастворимых солей	1. Визуальный 2. Опробование водной вытяжки на Cl и солянокислой вытяжки на SO ₄	+	+	+
Оглененность (наличие закиси железа)	Серовато-зеленый цвет	Визуальный	-	+	+
Ожелезненность (наличие окиси железа)	Бурый, красно-бурый и желто-бурый цвет	»	+	+	+
II. Естественное состояние					
Трещиноватость	1. Густота, ориентировка и размеры трещин 2. Характер поверхности трещин 3. Заполнение трещин	Визуальный и горный компас	+	+	-
Выветрелость	Изменение характерных для данной породы признаков и свойств (изменение цвета, уменьшение прочности для пород I класса, появление трещин, уменьшение связности, появление вторичных минералов и др.)	Визуальный	+	+	-
Естественная влажность	1. Изменение состояния породы при сжатии в руке 2. Влажность породы в весовых процентах	Визуальный (с помощью эталонной таблицы) В полевой лаборатории путем высушивания и взвешивания (по стандарту)	-	+	+
			+	+	+

Состав, свойства, состояние и признаки пород	Показатель	Методы определения	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
			породы с жесткими связями	породы без жестких связей	
				связные глинистые	несцементированные рыхлые (песчаные)
Степень заполнения пор водой	Коэффициент влажности (степень насыщения, коэффициент насыщения)	Вычисление или определение по номограмме	-	+	+
Естественная консистенция	1. Характер поведения при встряхивании, раскатывании в жгут, величина вдавливания конуса или штампа, нагрузка для вдавливания 2. Сопротивление вдавливанию 3. Показатель консистенции	1. Визуальный 2. С помощью полевого пенетromетра Прибор А. М. Васильева Вычисление по влажности и пределам пластичности	-	+	-
Степень плотности	Показатель степени плогности песков	Вычисление по максимальной, минимальной и естественной пористости	-	-	+
Степень уплотненности	Показатель степени уплотненности глинистых пород по В. А. Приклонскому	Вычисление по пределам пластичности и естественным влажности, пористости и удельному весу	-	+	-
III. Основные физические и водные свойства					
Естественный объемный вес	Вес единицы объема породы естественной структуры и естественной влажностью	Взвешивание образца известного объема (по стандарту)	+	+	+
Пористость	Отношение объема пор к объему всей породы	1. Вычисление по удельному и объемному весу 2. Определение по номограмме	+	+	+
Размокаемость	Характер и скорость размокания	Наблюдение за размоканием в приборе Знаменского	+	+	-
Набухаемость	1. Влажность набухания 2. Увеличение объема в процентах	В приборе НЗ Знаменского	+	+	-

Состав, свойства, состояние и признаки пород	Показатель	Методы определения	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
			породы жесткими связями	породы без жестких связей	
				связанные пластичные (глинистые)	несцементированные рыхлые (песчаные)
Пластичность	3. Давление набухания	Стандартный — конусом Раскатыванием в жгут (по стандарту) Вычислением по верхнему и нижнему пределам	—	+	—
	1. Верхний предел пластичности		—	+	—
	2. Нижний предел пластичности		—	+	—
Уплотненность	Показатель уплотненности песков	Вычислением по максимальной и минимальной пористости	—	+	—
	Водопроницаемость		Кoeffициент фильтрации	—	—
1. В трубке КФ		—		—	+
		2. Вычислением по формуле или номограммам по данным гранулометрического анализа	—	—	+

Косвенные показатели

Таблица 3

Показатель	Условное обозначение	Способ определения	Практическое применение	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
				породы с жесткими связями	породы без жестких связей	
					связанные пластичные (глинистые)	несцементированные рыхлые (песчаные)
Удельный вес	γ	Непосредственное определение в лаборатории	1. Вычисление пористости и коэффициента пористости	+	+	+

Показатель	Условное обозначение	Способ определения	Практическое применение	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
				породы с жесткими связями	породы без жестких связей	
					связанные пластичные (глинистые)	несцементированные рыхлые (песчаные)
Естественный объемный вес	Δ	Непосредственное определение в лаборатории	2. Вычисление влажности при пикнометрическом определении 1. Вычисление объемного веса скелета породы	+	+	+
Объемный вес скелета грунта	δ	Вычислением или с помощью номограммы по объемному и удельному весам	2. В качестве прямого расчетного показателя при различных инженерных расчетах Вычисление пористости	+	+	+
Естественная влажность	W	Непосредственное определение в лаборатории	1. Вычисление объемного веса скелета породы и пористости 2. Вычисление коэффициента консистенции для установления нормативного давления по СНиП II-Б. 1—62	+	+	+
Естественная пористость и коэффициент пористости	n ϵ	Вычисление или определение по номограмме	1. Вычисление веса породы	—	+	—
			2. Приближенное вычисление коэффициента фильтрации	+	+	+
			3. Вычисление коэффициента пористости, степени плотности и степени уплотненности	—	—	+
		4. Вычисление водоотдачи песков	—	+	+	
		5. Вычисление параметров компрессионной кривой	—	—	+	

Продолж. табл. 3

Показатель	Условное обозначение	Способ определения	Практическое применение	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
				породы с жесткими связями	породы без жестких связей	
					глинистые	рыхлые (песчаные)
Гравулометрический состав	—	Непосредственное определение в лаборатории	6. Определение плотности сложения песков для установления нормативного давления по СНиП II-Б.1—62 7. Установление просадочности макропористых грунтов по СНиПу 1. Вычисление показателей гравулометрического состава 2. Приближенное вычисление коэффициента фильтрации 3. Классификация песков по крупности зерен для выбора нормативного давления по СНиПу	—	—	+
Максимальная молекулярная влагоемкость	W_m	То же	1. Вычисление водоотдачи 2. Приближенное определение нижнего предела пластичности	—	—	+
Верхний предел пластичности (граница текучести)	W_l		1. Вычисление числа пластичности 2. Вычисление уплотненности глинистых грунтов 3. Установление просадочности и набухаемости по СНиПу	—	+	—
Нижний предел пластичности (граница раскатывания)	W_p	Непосредственное определение в лаборатории	1. Вычисление числа пластичности 2. Вычисление уплотненности глинистых пород	—	+	—

Продолж. табл. 3

Показатель	Условное обозначение	Способ определения	Практическое применение	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
				породы с жесткими связями	породы без жестких связей	
					глинистые	рыхлые (песчаные)
Число пластичности	M_p	Вычисление	3. Вычисление коэффициента консистенции по СНиПу 1. Классификация глинистых грунтов по СНиПу 2. Вычисление коэффициента консистенции для определения нормативного давления по СНиПу	—	+	—
Максимальный и минимальный объемные веса песков	δ_{max} δ_{min}	Непосредственное определение в лаборатории	Вычисление максимальной и минимальной пористости песков	—	+	—
Максимальная и минимальная пористости песков	n_{max} n_{min}	Вычисление	Вычисление уплотняемости песков	—	—	+
Максимальная высота капиллярного поднятия	H_k	Непосредственное определение в лаборатории	1. Для суждения о возможной высоте капиллярной зоны при подъеме уровня грунтовых вод 2. Использование в качестве прямого расчетного показателя	—	—	+
Коэффициент макропористости	ϵ_m	Расчетом и непосредственным определением в лаборатории	Оценка просадочности лёссовидных пород	—	+	—
Степень влажности	G	Расчетом по естественной влажности, коэффициенту пористости, удельному и объемному весам	Определение нормативного давления на мелкие и пылеватые пески по СНиПу	—	—	+

Таблица 4

Прямые показатели

Показатель	Условное обозначение	Практическое применение	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
			породы с жесткими связями	породы без жестких связей	
				связные пластичные (глинистые)	исцементированные рыхлые (песчаные)
Объемный вес в естественном состоянии и объемный вес породы под водой	Δ δ_u	1. Вычисление осадки сооружения 2. Расчет устойчивости основания 3. Расчет устойчивости откосов 4. Вычисление давления на подпорную стенку 5. Определение критической скорости для оценки суффозии	—	+	+
Коэффициент компрессии	α	1. Определение степени сжимаемости пород 2. Расчет осадки сооружения	—	+	+
Модуль компрессии	E_c	Оценка сжимаемости породы	—	+	+
Модуль общей (полной) деформации	E_0	Оценка осадки сооружения	—	+	+
Модуль упругости	E	Оценка упругих свойств породы	+	+	+
Коэффициент Пуассона	μ	1. Оценка деформируемости породы 2. Расчет фундаментов	+	+	+
Коэффициент бокового давления	ξ	Расчет устойчивости основания	—	+	+
Временное сопротивление сжатию	$R_{сж}$	Расчет устойчивости основания и оценка прочности пород	+	—	—
Коэффициент и угол сдвига	$f_0; \varphi_0$	1. Расчет устойчивости основания 2. Расчет устойчивости откоса 3. Расчет давления грунта на подпорную стенку	—	+	+

Продолж. табл. 4

Показатель	Условное обозначение	Практическое применение	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
			породы с жесткими связями	породы без жестких связей	
				связные пластичные (глинистые)	исцементированные рыхлые (песчаные)
Коэффициент и угол внутреннего трения	$f; \varphi$	То же	—	+	+
Сцепление	C	»	—	+	—
Угол естественного откоса	α	Оценка устойчивости откосов	—	—	+
Гранулометрический состав		1. Подбор оптимальных дорожных смесей 2. Расчет фильтров буровых на воду скважин 3. Оценка возможности механической суффозии и расчет обратных фильтров	—	+	+
Засоленность		1. Оценка выщелачиваемости 2. Прогноз переработки берегов	+	+	+
Коэффициент фильтрации	K	1. Определение подпора грунтовых вод 2. Расчеты потери на фильтрацию из водохранилища, каналов и т. п. 3. Расчеты притока воды в котлованы и другие горные выработки 4. Расчет водопонижения 5. Расчет дренажных сооружений 6. Расчет продолжительности осадки сооружения 7. Расчет ресурсов подземных вод	—	+	+
Коэффициент водоотдачи	μ_w	Оценка водообильности горных пород, подсчет ресурсов подземных вод и расчет подпора грунтовых вод во времени	+	—	+

Продолж. табл. 4

Показатель	Условное обозначение	Практическое применение	Класс и подгруппа пород, для которых определяется показатель		
			породы с жесткими связями	породы без жестких связей	
				связные пластичные (глинистые)	несцементированные рыхлые (песчаные)
Высота капиллярного поднятия	H_k	1. Определение глубины заложения фундамента 2. Расчет дренажа и гидроизоляции	+	+	+
Относительная просадочность	$\delta_{пр}$	Расчет возможных величин просадки толщи макропористых пород	-	+	-

Показатели свойств и состояния пород могут быть частными, обобщенными и расчетными.

Частные показатели представляют собой отдельно взятые значения какого-либо показателя, определенные на ряде образцов.

Обобщенные показатели получают путем усреднения методами математической статистики частных значений показателя какого-либо одного свойства. При этом усредняются только показатели, определенные на образцах одного петрографического типа пород и одинакового возраста и генезиса.

Расчетные показатели получают путем умножения обобщенных показателей на коэффициент запаса, величина которого в каждом конкретном случае устанавливается в зависимости от характера сооружения, его класса (ответственности), типа породы и других факторов.

Показатели свойств и состояния пород определяют на образцах с ненарушенным сложением и в состоянии естественной влажности. Отбору образцов для определения показателей должно предшествовать подробное геологическое изучение пород в поле в естественных условиях залегания, в массиве по обнажениям или по керну буровых скважин, а также изучение поведения пород в откосах выемок, под выстроенными сооружениями. Только на основе такого комплексного изучения можно правильно типизировать породы, наметить правильную систему отбора пород и методику лабораторных

исследований их. Подробно эти вопросы рассматриваются в курсе «Методика инженерно-геологических исследований».

Контрольные вопросы

1. На какие группы разделяются показатели состава, состояния и инженерно-геологических свойств горных пород и каково назначение каждой группы?
2. В чем заключается некоторая условность разделения показателей на группы?
3. Какова зависимость выбора показателей от характера породы, проектируемого сооружения и стадии проектирования?
4. Что такое обобщенные и расчетные показатели и как они определяются?
5. Опишите образцы глинистой, песчаной и скальной породы, дайте полную характеристику по классификационным показателям, определяемым визуально.

Литература

Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. VII, § 4. Строительные нормы и правила. Ч. 2, раздел А, глава 13. Инженерные изыскания для строительства. СНиП II-A.13—69, М., 1970.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГОРНЫХ ПОРОД И ЕГО ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Минералогический состав является одним из факторов, определяющих свойства пород. Наименьшее влияние он оказывает на свойства пород с жесткими кристаллизационными связями, наибольшее — на несвязные — песчаные и в особенности на связанные — глинистые породы.

Изучение минералогического состава имеет большое значение для инженерно-геологической оценки процессов выветривания для всех типов пород. Минералогический состав определяет скорость процессов выветривания и характер и свойства продуктов, получающихся в результате выветривания.

Минералы, из которых построены дисперсные — осадочные горные породы, могут быть разделены на три основные группы: 1) первичные практически нерастворимые в воде минералы; 2) вторичные минералы: а) нерастворимые и б) растворимые в воде минералы; 3) органогенные. Каждая из этих групп различно влияет на свойства пород.

По общему минералогическому составу различают мономинеральные и полиминеральные породы. Свойства первых в значительной мере определяются свойством минерала, из которого состоит порода, свойства вторых определяются сочетанием минералов и их соотношением.

Минералогический состав песчаных пород резко отличается от минералогического состава глинистых пород. В первых преобладают первичные нерастворимые в воде минералы, во вторых — вторичные и органико-минеральные соединения.

Рассмотрим указанные выше группы минералов.

Первичные нерастворимые в воде минералы. К этой группе относятся минералы, образовавшиеся из магмы и не претерпевшие существенных изменений. Они образуют скопления в результате выветривания главным образом магматических пород и являются основными составляющими различных песчаных пород.

В песчаных породах главным породообразующим минералом является кварц, относящийся к наиболее стойким в химическом отношении минералам. Наряду с кварцем в песчаных грунтах часто встречаются полевые шпаты, глауконит, слюда. В небольшом количестве могут присутствовать авгит, роговая обманка, оливин, магнетит и другие тяжелые, а также вторичные глинистые и простые водорастворимые минералы — кальцит, доломит, гипс, галит и др.

Присутствие некоторых минералов является характерным для

определенных генетических типов песков. Так, например, полевые шпаты входят в состав аллювиальных, делювиальных и флювиогляциальных песков, слюды характерны для эоловых песков, глауконит — для морских песков, а гипс — для песков безводных пустынь.

В природе наибольшим распространением пользуются кварцевые пески.

Физико-механические свойства большинства песков обусловлены зернами кварца — их размерами, формой и степенью окатанности.

В целом кварц придает рыхлым породам большую стойкость по отношению к воде и повышает сопротивление внешним воздействиям — нагрузкам от сооружений. Присутствие в составе пород других минералов, например растворимых в воде, снижает водостойкость и механическую прочность. Однако при оценке влияния первичных минералов на свойства пород следует иметь в виду, что это влияние иногда маскируется примесями других минералов, а также состоянием влажности породы.

В. А. Приклонский на основании данных В. В. Охотина указывает, например, что наибольшее сопротивление сдвигу оказывают частицы остроугольного кварца, наименьшее — частицы слюды, поэтому примесь слюды к чистым кварцевым пескам снижает показатель сопротивления сдвигу.

Вторичные нерастворимые в воде минералы. Это основные породообразующие минералы глинистых пород. Они составляют их тонкодисперсную — коллоидную часть. Их называют обычно глинистыми минералами.

Основной и наиболее характерной особенностью глинистых минералов является их высокая дисперсность (размеры частиц меньше 0,001 мм). Высокая дисперсность обуславливает чрезвычайно большую удельную поверхность и тем самым высокий потенциал поверхностной энергии. С последней связано проявление разнообразных поверхностных явлений, характерных для коллоидных систем.

Следует отметить, что глинистые породы состоят не только из одних глинистых минералов. В грубодисперсной части глины преобладают первичные минералы: кварц, полевые шпаты, слюда, а также тяжелые минералы (магнетит, титан, пирит и др.). Однако влияние вторичных — глинистых минералов даже при относительно небольшом их содержании в глинистой породе настолько велико, что они в значительной мере определяют свойства всей породы: (прочность, водопроницаемость).

Несмотря на большое распространение в природе и в связи с этим большую практическую важность, глинистые минералы изучены еще мало. Это объясняется весьма малыми размерами частиц, затрудняющими их изучение под обычными микроскопами. Только появление новых тонких методов исследования (рентгеноструктурный анализ, электронный микроскоп) позволило начать изучение глинистых минералов (И. Д. Седлецкий, И. И. Гинзбург и др.).

Глинистые минералы представляют собой вторичные водные силикаты, алюмосиликаты и ферросиликаты, а также простые окислы и гидраты окислов кремния, железа и алюминия.

Кроме незначительных размеров наиболее характерными признаками и свойствами глинистых минералов являются пластинчатая или чешуйчатая форма, обусловленная строением кристаллической решетки, низкие показатели преломления (немного больше, чем у канадского бальзама). Благодаря особенностям строения кристаллической решетки и малым размерам некоторые глинистые минералы обладают способностью, не разрушаясь, впитывать и отдавать воду, а также обмениваться с раствором катионами, поглощая из раствора одни катионы и взамен отдавая в раствор другие.

По химическому составу глинистые минералы делятся на группы по молекулярному соотношению окислов кремния SiO_2 к сумме полуторных окислов металлов R_2O_3 . В табл. 5 приведены вторичные минералы, наиболее часто встречающиеся в глинистых породах.

Наиболее распространены в глинистых породах три основные группы глинистых минералов — каолинита, монтмориллонита и гидрослюды.

Группа каолинита. Состоит из нескольких минералов, имеющих примерно одинаковый химический состав и отличающихся между собой по структуре и физическим свойствам. Эти минералы образуются при выветривании главным образом магматических и метаморфических пород в условиях кислой среды. Наиболее важное значение имеет и лучше изучен *каолинит*. Он главный породообразующий минерал каолинов и большинства других глинистых пород.

Таблица 5

Основные группы вторичных глинистых минералов

Группа минералов	Молекулярное отношение	Типичные представители группы	Формула химического состава по А. Г. Бетехтину
Окислы и гидраты окисей алюминия и железа	0	Диаспор	HAlO_2
	0	Гидраргиллит	$\text{Al}(\text{OH})_3$
	0	Лимонит	$\text{HFe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Каолинита	2	Каолинит	$\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_6$
	2	Диккит	$\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_6$
	2	Галлуазит	$\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Гидрослюды	2	Серицит	$\text{K}_{z_1}\text{Al}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	2	Иллит	$\text{K}_{z_1}\text{Al}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Монтмориллонита	3	Бейделлит	$\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	4	Монтмориллонит	$m\{\text{Mg}_s[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2\} \cdot p\{(\text{Al}, \text{Fe})_2\} \times [\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Окислы и гидраты окисей кремния		Опал	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Чистый каолинит белого цвета или слегка окрашен в бледные тона. Принадлежит к моноклинной системе. Обладает совершенной спайностью. Твердость 2,5. Удельный вес 2,58—2,59. Пластичен. При нагревании быстро теряет воду. Строение кристаллической решетки относительно прочное и устойчивое. Кристаллическую решетку каолинита можно представить себе в виде пакетов (рис. 1) молекул, составленных элементарными слоями атомов. Каждый пакет решетки состоит из пяти слоев атомов, расположенных в следующей последовательности: кислород, кремний, кислород с гидроксильной группой, алюминий, и венчается каждый пакет гидроксильной группой. Пакеты атомов повторяются, обуславливая пластинчатую структуру. При этом верхний слой нижнего пакета, образованный гидроксильной группой, соприкасается с нижним слоем верхнего, состоящего из атомов кислорода. Соприкосновение друг с другом разных слоев смежных пакетов обуславливает значительную скрепленность их друг с другом. Связи внутри пакетов также прочные вследствие чередования разноименных атомов. Эти особенности строения кристаллической решетки каолинита придают ей устойчивость, неподвижность. Расстояния между пакетами при увлажнении почти не меняются, поэтому минералы группы каолинита набухают слабо, водопроницаемость их значительно меньше водопроницаемости других глинистых минералов.

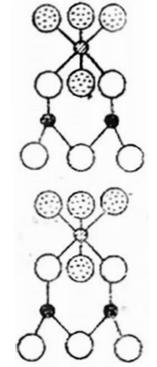


Рис. 1. Схема структуры кристаллической решетки каолинита

Группа монтмориллонита. Группа эта сложна и разнообразна. Основной минерал группы — монтмориллонит. Он образуется при химическом выветривании основных магматических пород в щелочных условиях, в сухом теплом климате. Химический состав его достаточно точно еще не установлен.

Монтмориллонит присутствует в составе многих глин. Он — основной минерал бентонитовых глин, которые употребляются для изготовления высококачественных глинистых растворов при проходке буровых скважин, преобладает он также во многих отбеливающих глинах.

Чистый монтмориллонит светло-желтой или сероватой окраски. Характерным отличием минералов монтмориллонитовой группы является переменное содержание в их составе воды. Оно сильно изменяется в зависимости от влажности окружающей среды, причем вода может выделяться в сухой воздух и поглощаться обратно из влажного воздуха, т. е. эти минералы характеризуются высокой гигроскопичностью.

При нагревании от 100 до 200°С монтмориллонит теряет адсорбированную воду; при температуре 500—700°С происходит выделение конституционной воды и разрушение кристаллической ре-

шетки. Этот процесс заканчивается при температуре 800—900° С, когда монтмориллонит переходит в аморфное состояние.

Строение кристаллической решетки монтмориллонита в общем очень близко к строению кристаллической решетки каолинита, но между ними есть и весьма существенное различие, которое и определяет совершенно отличные от каолинита свойства монтмориллонита. Кристаллическую решетку монтмориллонита можно представить в виде пакетов элементарных слоев, состоящих из различных атомов. Но если у каолинита элементарных слоев пять, то у монтмориллонита их семь: кислород, кремний, кислород с гидроксильной группой, алюминий, кислород с гидроксильной группой, кремний и кислород (рис. 2, а), т. е. каждый пакет имеет симметричное строение. Вследствие этого смежные пакеты соприкасаются друг с другом атомами кислорода, а поэтому связи между пакетами гораздо слабее, чем между пакетами каолинита.

При таком строении в кристаллическую решетку между пакетами может поступать различное количество воды, которая вызывает набухание монтмориллонита, раздвигает пакеты вплоть до полной потери связи между ними. Монтмориллонит сильно впитывает воду (до 600—700%), решетка его очень подвижная, и кристаллы этого минерала никогда не могут достигнуть заметных размеров. В воде они распадаются на частицы диаметром менее 0,00001 мм, обуславливая увеличение удельной поверхности.

Монтмориллонит хорошо адсорбирует из растворов (подземных вод) различные катионы. Это приводит к изменению свойств монтмориллонитовых глин (Са-бентонит и Na-бентонит). Такая особенность создает возможность искусственного воздействия на свойства монтмориллонитовых глин. Монтмориллонитовые глины по сравнению с каолинитовыми и другими глинами ха-

рактеризуются большей набухаемостью и сжимаемостью и малой водопроницаемостью.

Для решетки монтмориллонита характерно замещение алюминия магнием и кремния алюминием, которое вызывает появление свободных валентностей и увеличивает адсорбционную способность монтмориллонита.

Группа гидрослюды. Она занимает промежуточное положение между слюдами и монтмориллонитом. Характерный представитель этой группы — иллит. От слюд они отличаются большим содержанием воды, а от монтмориллонита — значительно меньшей способностью к набуханию и большим содержанием калия. Структура кристаллической решетки (рис. 2, б) гидрослюды близка к структуре монтмориллонита и отличается от последней наличием ионов калия, расположенных между пакетами, придающих структуре гидрослюды большую прочность и малую подвижность. Образуются гидрослюды в различных условиях при высокой концентрации калия в водных растворах.

Вторичные растворимые в воде минералы. В осадочных горных породах очень часто присутствуют вторичные минералы — растворимые в воде соли, которые по степени растворимости можно разделить на три группы: легкорастворимые, среднерастворимые и труднорастворимые.

Среди этих солей следует отметить: 1) легкорастворимые — галит NaCl , сильвин KCl , мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, сода Na_2CO_3 ; 2) среднерастворимые — гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ангидрит CaSO_4 ; 3) труднорастворимые — кальцит CaCO_3 , магнезит MgCO_3 , доломит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$

Легкорастворимые соли растворяются в воде быстро и в небольших ее количествах; **среднерастворимые соли** растворяются медленно, причем для полного их растворения и удаления из породы необходимо большое количество воды. **Труднорастворимые соли** переходят в водный раствор в незначительных количествах.

Если в поровом растворе преобладают ионы кальция, что обычно наблюдается в известковистых и загипсованных глинах, то такие породы в значительной мере теряют характерные для глин свойства: способность к набуханию, пластичность, сильную сжимаемость. Преобладание в поровом растворе натрия, характерное для засоленных глин морского происхождения, действует в направлении наиболее сильного проявления глинистых свойств, т. е. увеличивает набухаемость, пластичность, сжимаемость, уменьшает водопроницаемость.

Увеличение концентрации солей, растворенных в подземной воде, сказывается так же, как влияние грунтового раствора, насыщенного кальцием, и, наоборот, уменьшение концентрации растворенных в воде солей действует так же, как влияние грунтового раствора, насыщенного натрием, т. е. ведет к более резкому проявлению глинистых свойств.

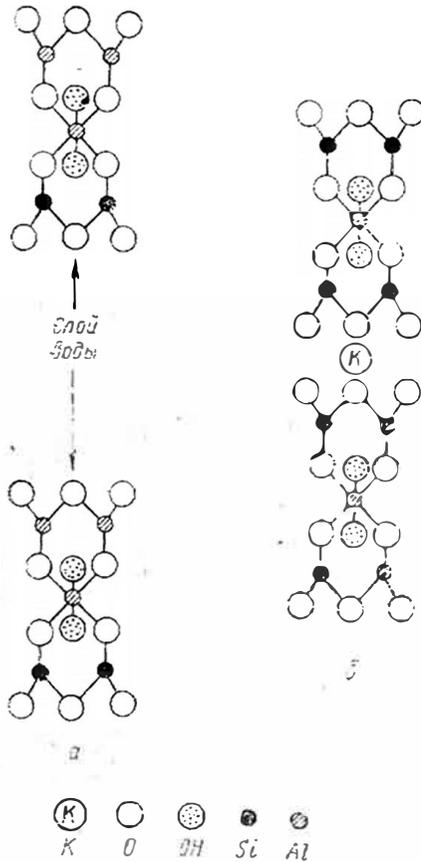


Рис. 2. Схема структур кристаллических решеток монтмориллонита (а) и гидрослюды (б)

Для примера приведем растворимость некоторых солей в воде в граммах на 100 см³ воды при t° = 10° C:

NaCl — 35,7	K ₂ SO ₄ — 9,7
KCl — 31,2	CaSO ₄ — 0,25
	CaCO ₃ — тысячные доли грамма

Влияние простых солей на породы различно и зависит от состава солей и формы, в какой они находятся в породе.

В твердом виде соли как бы цементируют породу, образуют связи и тем самым повышают ее прочность. Однако связи, образованные легкорастворимыми солями, быстро нарушаются под воздействием воды, связи же, образованные труднорастворимыми солями, прочные. Особенно велика роль труднорастворимых карбонатных солей кальция, которые придают породе водоустойчивость и прочность. Кроме оценки общего содержания солей следует изучать и характер распределения солей в породе. Оно может быть равномерным по всей породе, в виде отдельных включений, крупными кристаллами или в тонкораспыленном виде.

В растворенном виде простые соли насыщают поровый раствор, окружающий частицы породы. При этом, если порода содержит соли в твердом виде, они всегда будут и в растворе, заполняющем ее поры (насыщенный раствор). Если какая-либо соль присутствует в растворе ненасыщенном, то в твердом виде в породе этой соли может не быть.

Исходя из сказанного выше, можно сделать очень важный в практическом отношении вывод о том, что, меняя состав или концентрацию солей в поровом растворе, можно искусственно воздействовать на инженерно-геологические свойства пород, менять в нужном для инженерной деятельности человека направлении.

По степени засоления выделяют: а) незасоленные породы, содержащие водорастворимых солей менее 0,2% от веса сухой породы; б) слабозасоленные, содержащие от 0,2 до 0,5% водорастворимых солей; в) засоленные, содержащие более 0,5% водорастворимых солей.

Органические соединения. В рыхлых, особенно в глинистых породах, очень часто встречается органическое вещество, которое накапливается в породах в результате жизнедеятельности животных и растительных организмов. Наибольшее количество органических веществ имеет растительное происхождение. Органические вещества растительного происхождения образуют большие скопления (месторождения торфа, угля и пр.) или (в большинстве случаев) содержатся в породах в рассеянном виде в так называемых торфянистых и гумусированных породах. Эти органические вещества часто находятся в тесном химическом соединении с минеральной частью породы.

Примесь органического вещества, как правило, изменяет свойства пород — определяет высокую влагоемкость, высокую пластич-

ность, низкую водопроницаемость, высокую сжимаемость под нагрузкой и низкое сопротивление сдвигу.

Влияние органического вещества на свойства пород зависит от степени разложения растительных остатков. Установлено, что чем больше степень разложения растительных остатков, тем сильнее их влияние на инженерно-геологические свойства пород.

Об изучении минералогического состава глинистых пород. Изучение минералогического состава глинистых пород — весьма сложная задача. Сложность объясняется в основном тремя причинами: малым размером глинистых частиц, полиминеральным составом большинства глинистых пород и их полидисперсностью. Для облегчения определения минералогического состава применяется предварительное разделение тонкодисперсной части на группы фракций (гранулометрический анализ). Обычно выделяют фракции 0,005—0,001; 0,001—0,0005; 0,0005—0,0001 и менее 0,0001 мм.

Выделенные группы фракций разделяют по удельному весу в тяжелых жидкостях. Применяя набор из 8—10 жидкостей различной плотности, можно разделить фракции соответственно на 8—10 групп по удельному весу. Выделенные группы изучают с помощью химического анализа, иммерсионного метода, рентгеноструктурного, электронной микроскопии, термического анализа, хроматографии.

При валовом химическом анализе изучают способами аналитической химии образцы глин в целом и отдельные составляющие ее фракции.

Суть иммерсионного анализа заключается в определении показателей преломления минералов путем сопоставления их с показателями преломления стандартного набора жидкостей.

Рентгеноструктурный анализ основывается на получении рентгенограмм изучаемой породы. Каждому минералу свойственна своя рентгенограмма. Снимки сравнивают с эталонами.

Электронно-микроскопический метод дает возможность получать изображения изученных минералов при увеличении до 60 000 и более раз.

Термический анализ основан на изучении кривых температур, получающихся при нагревании минералов. Происходящие при этом процессы потери воды и разрушение кристаллической решетки дают на кривой характерные точки (эндотермическая и экзотермическая остановки), различные для разных минералов.

Хроматография основана на избирательной адсорбции глинистых минералов. Осуществляется с помощью специальных органических красителей, при взаимодействии с которыми каждый минерал приобретает особую, только ему свойственную окраску.

Легкорастворимые соли определяют, изучая химический состав водной вытяжки из изучаемой породы в целом или из отдельных фракций.

Для определения *средне- и труднорастворимых солей* применяют химический анализ солянокислых или уксуснокислых вытяжек.

О суммарном содержании органических веществ в породах ориентировочно судят по величине потери веса при прокаливании сухого остатка в породе. Более точно содержание органического вещества может быть определено по данным вытяжек органическими растворителями.

Контрольные вопросы

1. На какие основные группы разделяются минералы дисперсных горных пород и по каким признакам?
2. Как влияют на свойства пород первичные минералы?
3. Какие минералы относятся к вторичным и каковы особенности их?
4. Перечислите основные группы вторичных глинистых минералов и укажите основные свойства их.
5. Каковы различия в строении кристаллической решетки монтмориллонита и каолинита и как это отражается на свойствах пород, состоящих из этих минералов?
6. Как влияют простые соли на свойства пород?
7. Как влияют органические соединения на свойства пород?
8. Какими методами изучают минералогический состав глинистых пород?

Литература

Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов О. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. I.
Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Под ред. Е. М. Сергеева, С. Н. Максимова и Г. М. Березиной. М., Изд-во МГУ, 1968. Т. I, гл. 8, 15.

ГЛАВА 4 ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОД БЕЗ ЖЕСТКИХ СВЯЗЕЙ

Породы без жестких связей, или, как их называют, *дисперсные горные породы*, состоят из отдельных зерен различной величины, формы и вещественного состава. Размеры частиц определяют по их диаметру и выражают в миллиметрах. Они изменяются от нескольких метров в крупнообломочных породах (крупные глыбы) до тысячных и миллионных долей миллиметра в глинистых породах (мельчайшие коллоидные частицы).

Частицы, близкие по размерам, объединяют в группы. Группы частиц определенного размера называют *фракциями гранулометрического состава*.

Под гранулометрическим (механическим) составом породы понимают относительное содержание в ней (по весу) частиц различной величины. Гранулометрический состав — один из важных факторов, определяющих свойства породы. От него зависят такие важные характеристики пород, как *пластичность, пористость, сопротивление сдвигу, сжимаемость, усадка, набухание, высота капиллярного поднятия, водопроницаемость* и др.

Изменение гранулометрического состава пород вызывает изменение их свойств. Например, с уменьшением размера частиц обломочных рыхлых пород уменьшается водопроницаемость их. Так, галечники, сложенные частицами размером более 20 мм, обладают большой водопроницаемостью, у песков, состоящих из частиц от 0,05 до 2 мм, она значительно ниже, а у глин с размерами частиц меньше 0,005 мм она ничтожна и практически считается равной нулю.

От размера частиц дисперсных пород зависит величина свободной энергии. С уменьшением размеров частиц быстро возрастает их суммарная поверхность. Общее представление о суммарной поверхности дает так называемая удельная поверхность. Под *удельной поверхностью* понимают суммарную поверхность всех частиц, заключенных в кубическом сантиметре или в одном грамме породы. Эта поверхность, являясь поверхностью раздела двух различных сред (твердое вещество — вода или газ), обладает большим запасом энергии, обуславливающей разнообразные поверхностные явления в тонкодисперсных породах (см. гл. 10).

Быстрое изменение удельной поверхности по мере дробления породы на более мелкие частицы можно иллюстрировать следующим примером. Возьмем частицу породы в форме правильного куба объемом 1 см³. Суммарная поверхность всех граней куба равна 6 см². Если раздробить этот кубик на кубики с длиной ребра в два

раза меньше, т. е. 0,5 см, то получится 8 кубиков с удельной поверхностью, равной 12 см². Если же раздробить исходный кубик на кубики с длиной ребра 0,01 см, то удельная поверхность полученных таким образом 1 000 000 кубиков составит уже 600 см². И, наконец, если один кубик с длиной ребра 1 см раздробить на кубики с длиной ребра 0,1 мк, суммарная поверхность всех кубиков будет составлять сотни квадратных метров. При таком раздроблении, обладая огромной поверхностью энергией, породы приобретают характерные коллоидные свойства, резко отличающие их от менее раздробленных. Поэтому изучение гранулометрического состава представляет большой практический интерес как для грубодисперсных, так и тонкодисперсных пород.

Классификация фракций и пород по гранулометрическому составу. Существует значительное количество классификаций фракций и пород по гранулометрическому составу применительно к различным отраслям народного хозяйства (дорожное строительство, промышленность строительных материалов, почвенные исследования, промышленное и гражданское строительство).

В строительных целях наиболее распространенной в настоящее время является классификация фракций, приведенная в табл. 6, в которой учитывается размер фракций, а для крупнообломочных фракций — и их форма.

Таблица 6
Классификация гранулометрических фракций

Наименование фракций	Степень крупности	Размер частиц, мм
Валуны (окатанные) и камни (угловатые)	Крупные	> 800
	Средние	800—400
	Мелкие	400—200
Галька (окатанные) и щебень (угловатые)	Очень крупные (булыжник)	200—100
	Крупные	100—60
	Средние	60—40
	Мелкие	40—20
Гравий (окатанные) и дресва (угловатые)	Крупные	20—10
	Средние	10—4
	Мелкие	4—2
	Очень крупные	2—1
Песчаные частицы (песок)	Крупные	1—0,5
	Средние	0,5—0,25 ✓
	Мелкие	0,25—0,10 ✓
	Тонкие	0,10—0,05 ✓
	Очень тонкие	0,05—0,01
Пылеватые частицы (пыль)	Крупные	0,05—0,01
	Мелкие	0,01—0,005
Глинистые частицы	Грубые	0,005—0,001
	Тонкие	< 0,001

Выделение отдельных групп фракций в приведенной выше классификации основано на специальных исследованиях В. В. Охотина, М. М. Филатова и др., установивших, что выделенным фракциям присущи определенные петрографические особенности и характерные только для них свойства.

Валуны, глыбы, гальки, гравий (камни, щебень, хряц), т. е. частицы больше 2 мм, между собой различаются только по размеру частиц. Они состоят из обломков горных пород разного петрографического состава или (реже) из отдельных минералов. Эти частицы не задерживают воду, т. е. характеризуются совершенной водоотдачей, высокой водопроницаемостью, которая увеличивается по мере увеличения размера частиц, не обладают капиллярными свойствами, сыпучие.

Песчаные частицы (0,05—2 мм) представляют собой скопление зерен разных минералов (кварц, полевые шпаты, глауконит, кальцит, слюды и др.). Преобладает главным образом устойчивый против выветривания минерал кварц, количество которого увеличивается по мере уменьшения крупности песка. Песчаные частицы не обладают связностью, в сухом состоянии — сыпучие. В воде не размокают, не набухают, не пластичны и не обладают липкостью. Водопроницаемы. Водопроницаемость увеличивается по мере увеличения размеров частиц. Обладают капиллярными свойствами, причем высота капиллярного поднятия увеличивается по мере уменьшения размера частиц. Водоотдача хорошая. Песчаные частицы меньше 0,25 мм при полном водонасыщении могут переходить в плавунное состояние.

Пылеватые частицы (0,005—0,05 мм) состоят преимущественно из аморфной кремнекислоты. В сухом состоянии характеризуются весьма слабой связностью. В воде не набухают, не пластичны. Легко переходят в плавунное состояние. Обладают высокой капиллярностью. Водопроницаемость и водоотдача слабая.

Глинистые частицы (частицы меньше 0,005 мм) состоят главным образом из вторичных глинистых минералов: монтмориллонита, каолинита, гидрослюд, гидратов окиси железа; кварц содержится в небольшом количестве. Обладают связностью, большой влагоемкостью. Практически водонепроницаемы. Сильно набухают в воде, пластичны, обладают липкостью. В сухом состоянии могут представлять собой твердое тело, при переувлажнении могут переходить в текучее состояние. Характеризуются коллоидными свойствами.

В природных условиях рыхлые и связные породы обычно представляют собой различные смеси из указанных выше фракций. В зависимости от преобладания в породе тех или иных фракций она по своим свойствам может приближаться к свойствам песчаных или глинистых частиц или занимать промежуточное положение между этими фракциями.

На основе учета особенностей рыхлых и связных пород в зависимости от их гранулометрического состава разными авторами предложено значительное количество гранулометрических классификаций этих пород. Рассмотрим лишь наиболее распространенную из них — классификацию В. В. Охотина, созданную для целей дорожного строительства. В ее основу положен учет соотношений трех основных групп фракций — песчаных, пылеватых и глинистых (табл. 7).

Таблица 7

Гранулометрическая классификация пород
(по В. В. Охотину, 1940)

Наименование грунта	Содержание частиц, %		
	глинистых < 0,005 мм	пылеватых 0,005—0,05 мм	песчаных 0,05—2,0 мм
Глина	>30	—	—
Суглинок тяжелый	30—20	—	—
Суглинок средний	20—15	—	Больше, чем пылеватых
Суглинок средний пылеватый	20—15	Больше, чем песчаных	—
Суглинок легкий	15—10	—	Больше, чем пылеватых
Суглинок пылеватый	15—10	Больше, чем песчаных	—
Супесь тяжелая	10—6	—	Больше, чем пылеватых. Преобладают частицы 2—0,25 мм
Супесь мелкозернистая	10—6	—	Больше, чем пылеватых. Преобладают частицы 0,25—0,05 мм
Супесь тяжелая пылеватая	10—6	Больше, чем песчаных	—
Супесь легкая	6—3	—	Больше, чем пылеватых. Преобладают частицы 2—0,25 мм
Супесь легкая мелкозернистая	6—3	—	Больше, чем пылеватых. Преобладают частицы 0,25—0,05 мм
Супесь легкая пылеватая	6—3	Больше, чем песчаных	—
Песок	<3	—	Больше, чем пылеватых. Преобладают частицы 2—0,25 мм
Песок мелкозернистый	<3	—	Больше, чем пылеватых. Преобладают частицы 0,25—0,05 мм

В строительных целях глинистые породы, согласно СНиП II-Б. 1—62, классифицируются по числу пластичности, а песчаные и крупнообломочные — согласно табл. 8.

Таблица 8

Классификация крупнообломочных и песчаных пород
для строительных целей по СНиПу

Наименование видов пород	Распределение частиц по крупности в % от веса сухой породы
<i>Крупнообломочные</i>	
Грунт щебенистый (при преобладании окатанных частиц — галечниковый)	Вес частиц крупнее 10 мм составляет более 50%
Грунт дресвяный (при преобладании окатанных частиц — гравийный)	Вес частиц крупнее 2 мм составляет более 50%
<i>Песчаные</i>	
Песок гравелистый	Вес частиц крупнее 2 мм составляет более 25%
Песок крупный	Вес частиц крупнее 0,5 мм составляет более 50%
Песок средней крупности	Вес частиц крупнее 0,25 мм составляет более 25%
Песок мелкий	Вес частиц крупнее 0,1 мм составляет 75%
Песок пылеватый	Вес частиц крупнее 0,1 мм составляет менее 75%

Для установления наименования породы по указанной классификации последовательно суммируются проценты содержания частиц исследуемого образца: сначала крупнее 10 мм, затем крупнее 2 мм, крупнее 0,5 мм и т. д.

Наименование породе дается по первому удовлетворяющему показателю в порядке расположения наименований в табл. 8. Следует отметить, что эта классификация песков и крупнообломочных пород научно не обоснована и характеризуется рядом недостатков, главные из которых следующие: 1) полное игнорирование минералогического состава; 2) отсутствие группы тонкозернистых песков, широко развитых в морских и озерных отложениях; 3) неправильное выделение пылеватых песков в особую группу: пылеватыми могут быть любые пески при значительном содержании в них пылеватых частиц.

Методы изучения гранулометрического состава. Для определения зернового — гранулометрического, или механического, состава породы производят гранулометрический анализ. Этот анализ состоит в расчленении дисперсной породы на близкие по величине группы фракций.

В настоящее время разработано много способов гранулометрического анализа. Эти способы можно объединить в следующие группы: визуальные, ситовые, гидравлические, аэродинамические и оптические. Результаты гранулометрического анализа выражаются в % содержания по весу, определенных анализом различных групп фракций.

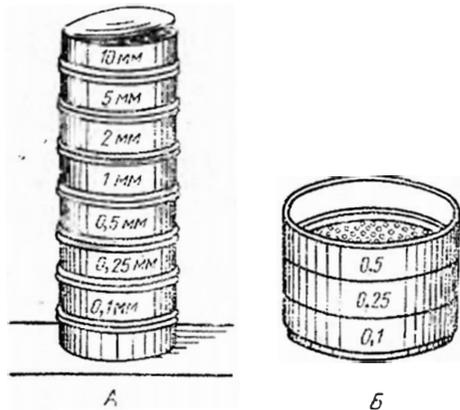


Рис. 3. Комплект сит для гранулометрического анализа песков: А — полный комплект; Б — набор малых сит с отверстиями 0,5—0,25 и 0,10 мм

на различные фракции (рис. 3).

Для инженерно-геологических целей обычно берут стандартный комплект, состоящий из семи сит: четырех сит с крупными штампованными отверстиями диаметром 10, 5, 2 и 1 мм и трех сит из латунной сетки простого плетения с отверстиями размером 0,5; 0,25 и 0,10 мм.

Ситовой анализ — основной метод изучения гранулометрического состава песков. Он носит самостоятельный характер для анализа песков, не содержащих частиц меньше 0,1 мм. В противном случае ситовой анализ проводится в комбинации с каким-либо другим методом, необходимым для разделения тонкопесчаных, пылеватых и глинистых фракций.

Для разделения песка на ситах отбирают представительный образец изучаемого песка, доводят его до воздушно-сухого состояния и затем пропускают последовательно через весь набор сит, начиная с сита с наиболее крупными отверстиями. Частицы, задерживающиеся на ситах, а также частицы, прошедшие через последнее сито (с наиболее мелкими отверстиями), взвешивают, и результаты выражают в процентах по отношению к общей навеске, взятой для анализа, вес которой принимается за 100%.

Гидравлические методы анализа основаны на различии в скорости падения в воде частиц разной крупности. Они имеют много различных модификаций: отмучивание в спокойной воде (метод Саба-

К группе *визуальных методов* относится целая серия методов, основанных на измерении и описании зернового состава пород на глаз или под лупой путем сравнения с эталонными коллекциями, сравнения с таблицами (трафаретами) и шкалами и др. Методы эти используются главным образом для полевого описания пород и предварительной оценки их гранулометрического состава.

Ситовой метод гранулометрического анализа основан на использовании различных комплектов сит для разделения песчаных пород

нина, Аттерберга, Вильямса, Рутковского и др.); разделение током воды (способ Шене, Охотина и др.), непрерывный отбор проб из приготовленных суспензий¹ (метод Робинсона, пипеточный анализ); взвешивание осадков, последовательно выпадающих из суспензии при ее отстаивании; учет изменения плотности или гидростатического давления суспензии (ареометрический анализ, метод Вагнера и др.).

Из перечисленных методов в качестве основного для инженерно-геологических целей рекомендуется ареометрический анализ.

Ареометрический метод гранулометрического анализа основан на измерении удельного веса суспензии, изменяющегося во времени по мере выпадения из суспензии более крупных частиц. Этим методом определяют содержание любых частиц диаметром менее 0,25 мм. Содержание фракций крупнее 0,25 мм определяют предварительно ситовым методом. При проведении этого анализа используют зависимость между размером частиц и скоростью их падения в воде, установленную Стоксом:

$$d = \sqrt{\frac{1800\eta}{(\gamma - \gamma_w) 981} v},$$

где η — вязкость воды; $v = \frac{H}{T}$ — скорость падения частиц диаметром d ; H — длина пути частицы, см; T — время падения частиц, сек; γ — удельный вес породы; γ_w — удельный вес воды.

Стокс вывел формулу скорости падения частиц в жидкости, исходя из предположения, что объем жидкости в суспензии не ограничен, вязкость жидкости постоянна, все частицы имеют одинаковый удельный вес и шарообразную форму. Практически же при производстве гранулометрического анализа таких идеальных условий не бывает, а поэтому диаметр определяемых частиц не соответствует диаметру, вычисленному для этой скорости по формуле Стокса. Кроме того, при анализе глинистых засоленных пород наблюдаются явления коагуляции (слипание частиц, образование из элементарных частиц агрегатов), которые также искажают результаты гранулометрического анализа гидравлическим способом. Это несоответствие вычисленных и действительных диаметров частиц можно обнаружить, рассматривая выделенные фракции под микроскопом.

Для устранения влияния коагуляции производят специальную химическую подготовку суспензии (стабилизацию), исключающую возможность слипания частиц. Влияние формы частиц и разных



Рис. 4. Ареометр — прибор для проведения гранулометрического анализа

¹ Под суспензией понимается специально приготовленный раствор, состоящий из воды и взвешенных в ней элементарных частиц породы (дисперсная фаза).

удельных весов сказывается на результатах анализа значительно меньше, чем коагуляция, поэтому оно не учитывается. Для решения специальных вопросов и для научных целей иногда прибегают к разделению частиц по удельному весу (выделение легких и тяжелых минералов), а затем уже производят раздельный гранулометрический анализ.

Анализ выполняется с помощью ареометра (рис. 4), устройство которого основано на законе Архимеда. Он состоит из луковички, заполненной дробью, и стержня с измерительной шкалой. Ареометр погружается в суспензию и по его шкале через определенные промежутки времени делают отсчеты. При постоянном объеме ареометра, погруженного в суспензию, более тяжелой жидкости будет вытеснено меньше, а более легкой — больше. Следовательно, чем больше будет концентрация суспензии, тем больше будет ее удельный вес и тем меньше глубина, на которую будет погружаться в нее ареометр. При длительном отстаивании суспензии взвешенные в ней частицы породы, подчиняясь закону силы тяжести, падают на дно сосуда и удельный вес суспензии уменьшается. В соответствии с изменением удельного веса суспензии ареометр постепенно погружается глубже и глубже.

Удельный вес суспензии измеряют через определенные промежутки времени и по специальной номограмме (рис. 5, см. вкл.) определяют диаметр фракций, соответствующих выполненным замерам, а затем с помощью простейших построений и расчетов определяют процентные содержания в породе любых необходимых для практических целей фракций.

В практике ареометрический анализ используется в комбинации с ситовым анализом.

Аэродинамические методы основаны на использовании движущейся струи воздуха для выделения частиц, из которых состоит изучаемая порода. Эти методы не получили в СССР распространения в практике лабораторных исследований.

Оптический метод основан на определении размеров частиц с помощью микроскопа. Это наиболее точный метод изучения гранулометрического состава пород. Он дает возможность не только непосредственно измерить размер фракций, но и определить их форму, чего нельзя сделать с помощью всех других способов гранулометрического анализа. Измерение размеров зерен и определение их формы осуществляются с помощью специальных приспособлений к микроскопу (окуляр-микрометры, препаратоловодитель). Оптический метод гранулометрического анализа наиболее трудоемкий и дорогой из всех других методов, поэтому в инженерно-геологической практике он не применяется. Его используют в научно-исследовательских целях и в качестве контрольного — для производства арбитражных анализов.

Графическая обработка и практическое использование данных гранулометрического анализа. Результаты гранулометрического анализа инженерно-геологические лаборатории выдают в виде таблиц. Однако эти таблицы неудобны для пользования, лишены на-

глядности и ни в какой мере не дают обобщений для научно-производственных выводов. В инженерно-геологической практике применяют различные графические приемы и способы обработки и графического изображения гранулометрического состава пород. Из многочисленных способов такого изображения наибольшее распространение получили циклограммы, суммарные кривые гранулометрического состава и диаграммы-треугольники.

Циклограмма. Площадь круга произвольного радиуса разбивается на секторы с длинами дуг, пропорциональными содержанию каждой фракции. Площади секторов закрашиваются или заштриховываются в соответствии с принятыми условными обозначениями фракций. Вдоль каждого отрезка дуги, вне круга, указывается процентное содержание соответствующей фракции (рис. 6).

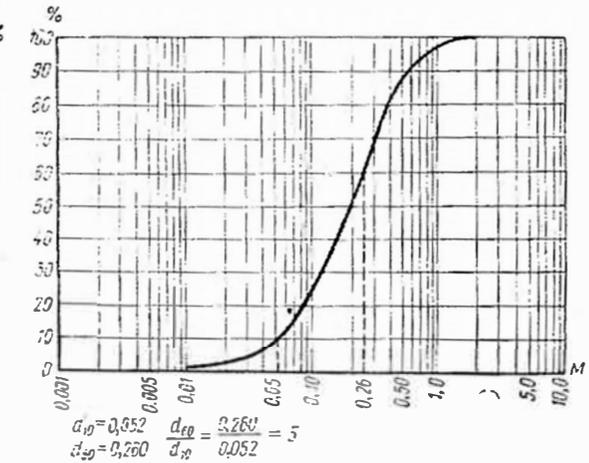
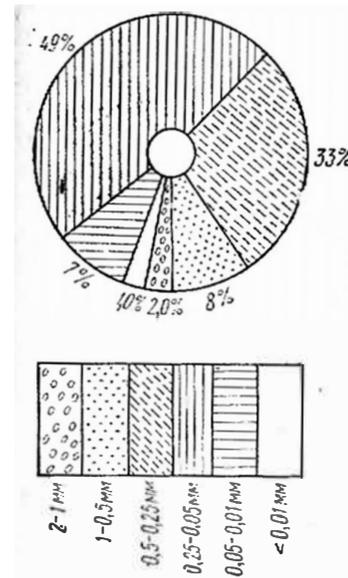


Рис. 6. Циклограмма гранулометрического анализа

Рис. 7. Интегральная кривая гранулометрического состава породы

Интегральная кривая гранулометрического состава. Используется наиболее широко. Она может быть построена в обыкновенном или в полулогарифмическом масштабе. Обыкновенный масштаб неудобен тем, что вследствие широкого диапазона диаметров частиц графики получаются непомерно растянутыми по горизонтальной оси. Построение кривых в полулогарифмическом масштабе позволяет наносить содержание мелких фракций с достаточной точностью, не удлиняя кривую по оси абсцисс.

Для построения кривой в полулогарифмическом масштабе (рис. 7) по оси абсцисс откладывают размеры диаметров частиц в миллиметрах, пропорциональные логарифмам. В начале координат

ставят обычно число 0,001, а затем, принимая $\lg 10$ равным произвольному отрезку, откладывают этот отрезок в правую сторону от начала графы три-четыре раза, делая отметки и ставя против них последовательно числа 0,01; 0,10; 1,00. Расстояния между каждыми двумя метками делят на девять частей пропорционально логарифмам чисел 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9.

В первом от начала координат выделенном отрезке будут абсциссы, отвечающие диаметрам частиц от 0,002 до 0,009 мм, во втором — от 0,01 до 0,09 мм, в третьем — от 0,1 до 0,9 мм и в четвертом — от 1 до 10 мм.

Так, если принять, что $\lg 10 = 1$ соответствует отрезку длиной 4 см, то $\lg 2 = 0,301$ будет соответствовать отрезку $0,301 \times 4 = 1,2$ см, $\lg 3 = 0,477$ — отрезку $0,477 \times 4 = 1,9$ см, $\lg 4 = 0,602$ — отрезку $0,602 \times 4 = 2,4$ см и т. д.

Указанные отрезки откладывают по оси абсцисс от начала координат и от каждой метки, ограничивающей отрезок длиной 4 см.

Аналогичную шкалу можно разметить на графике, пользуясь шкалой делений логарифмической линейки.

После нанесения сетки графика по оси ординат откладываются суммарные содержания фракций в процентах. Для этого последовательно суммируют содержание фракций, начиная с наиболее мелкой и кончая наиболее крупной и по этим числам строят кривую. Каждое из полученных чисел показывает суммарное содержание фракций меньше определенного диаметра (диаметр наиболее крупной фракции, вошедшей в данную сумму).

Интегральные кривые гранулометрического состава дают возможность на одну сетку наносить несколько кривых и легко находить действующий диаметр и «контролирующий диаметр» для каждой кривой.

Под действующим, или эффективным, диаметром (d_{10}) какой-либо породы понимают размер частиц, соответствующий ординате 10% на интегральной кривой гранулометрического состава. Эта условная величина используется при подсчетах коэффициента фильтрации песков по данным их гранулометрического состава.

Действующий, или эффективный, диаметр зерен находят следующим образом: из точки на оси ординат, соответствующей 10%, проводят линию параллельно оси абсцисс до пересечения с кривой; из точки пересечения опускают перпендикуляр на ось абсцисс; полученная на оси абсцисс точка и покажет значение действующего, или эффективного, диаметра.

Под «контролирующим диаметром» понимается размер частиц, соответствующий ординате 60% на интегральной кривой гранулометрического состава. Графически он определяется аналогично действующему диаметру.

Отношение d_{60}/d_{10} называют коэффициентом неоднородности. Чем больше коэффициент неоднородности, тем более разнородной по гранулометрическому составу является порода.

О степени неоднородности породы можно судить и по характеру интегральной кривой гранулометрического состава. Крутая кри-

вая указывает на однородность породы по гранулометрическому составу, полагая — на неоднородность.

Диаграмма-треугольник. При большом числе гранулометрических анализов для сравнения их удобно пользоваться треугольной диаграммой Фере (рис. 8). Этот способ позволяет изображать содержание не отдельных фракций, а трех основных групп фракций — песчаной, пылеватой и глинистой. При построении этой диаграммы используется основное свойство равностороннего треугольника — сумма перпендикуляров, опущенных из какой-либо точки внутри треугольника на все три его стороны, равна высоте треугольника. Высоту треугольника (или его стороны) делят на 100 частей и от разных сторон треугольника откладывают содержание (в процентах) в породе глинистых, пылеватых и песчаных фракций.

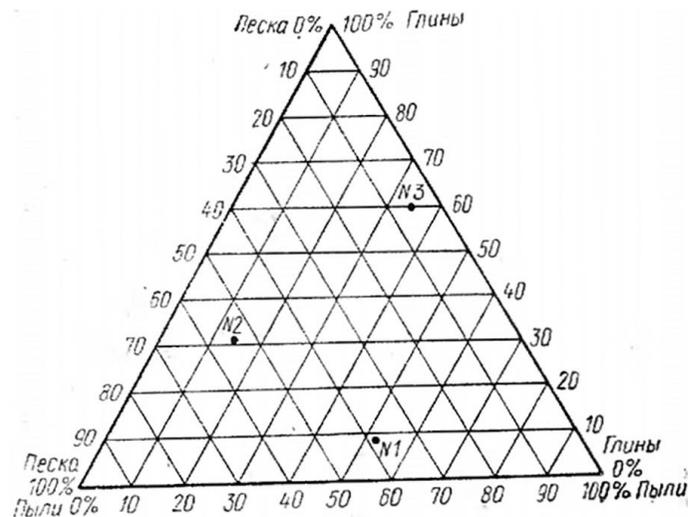


Рис. 8. Диаграмма — треугольник гранулометрического состава

Разбив треугольник на части в соответствии с той или иной трехчленной классификацией, можно сразу по положению той или иной точки внутри треугольника определить наименование породы по этой классификации. На рис. 8 показан такой треугольник, построенный по данным трех анализов различных пород.

	Песчаные фракции, %	Пылеватые фракции, %	Глинистые фракции, %
Анализ 1	37	55	8
Анализ 2	53	15	32
Анализ 3	4	36	60

Из помещенных на рисунке данных видим, что первый из анализов (№ 1) относится по классификации В. В. Охотина к супеси

тяжелой пылевой, второй (№ 2) — к суглинкам тяжелым и третий (№ 3) — к глинам.

Ф. В. Котлов для графической обработки гранулометрических анализов предложил сдвоенные треугольники (рис. 9). Верхний служит для изображения результатов анализа песчаных пород нижний — глинистых пород.

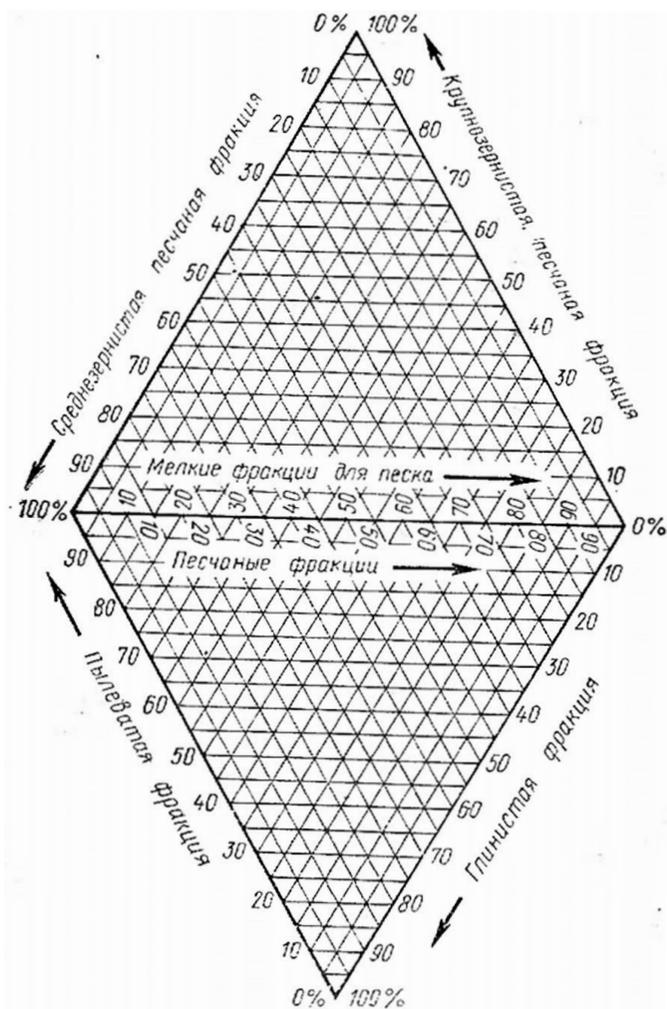


Рис. 9. Диаграмма: сдвоенные треугольники гранулометрического состава пород по Ф. В. Котлову

Результаты гранулометрического анализа могут быть обработаны методами математической статистики. Они дают возможность определить средние содержания различных фракций в изучаемой

породе, исключить возможные грубые ошибки и получить значения содержаний различных фракций в изучаемой породе, которые могут быть использованы для различных расчетов.

Данные гранулометрического анализа используются для решения целого ряда практических вопросов, важнейшими из которых являются:

- классификация пород по их гранулометрическому составу для типизации пород, составления разрезов и карт;
- приближенный расчет коэффициента фильтрации песчаных пород по эмпирическим формулам;
- оценка пригодности пород как дорожно-строительного материала для отсыпки полотна дорог, тела дамб, насыпей, земляных плотин;
- конструирование фильтров буровых скважин в водоносных песках; расчет оптимальных отверстий;
- оценка возможных явлений суффозии (выноса частиц) из тела фильтрующих плотин и их оснований, из стенок котлованов и шахт, бортов выемок и др.; расчет обратных фильтров, предупреждающих явления суффозии;
- оценка рыхлых несвязных пород в качестве инертных добавок в бетон;
- определение по СНиПу нормативного давления на основание / фундаментов сооружений, проектируемых на песчаных породах.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под гранулометрическим составом породы без жестких связей между зернами?
2. Основные методы изучения гранулометрического состава.
3. Основные допущения в формуле Стокса и как они влияют на результаты анализа.
4. Графические способы обработки результатов гранулометрического анализа.
5. Что такое эффективный диаметр и при решении каких вопросов он используется?
6. Для решения каких практических задач используются данные гранулометрического состава?

Литература

Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. II, § 3 и 4.

СТРУКТУРА, ТЕКСТУРА, ТРЕЩИНОВАТОСТЬ.
СТРУКТУРНЫЕ СВЯЗИ
И ИХ ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Единого, общепринятого определения понятий структуры и текстуры в геологии нет. Некоторые исследователи считают эти понятия однозначными и различают их только в отношении масштаба изучаемых элементов: при изучении макроэлементов породы применяют термин «текстура», при изучении микроэлементов — «структура».

В инженерной геологии под *структурой* понимают такие особенности строения горных пород, которые определяются размером, формой и количественным соотношением отдельных минеральных частиц или их агрегатов, а также органических остатков слагающих породу.

Под *текстурой* пород понимают совокупность признаков, характеризующих пространственное размещение минеральных частиц или агрегатов в породе и монолитность — степень сплошности породы. К текстурным особенностям относятся слоистость отдельность, сланцеватость, пористость и т. д.

Текстурные и структурные особенности пород должны изучаться при инженерно-геологических исследованиях и учитываться при отборе образцов для исследований и при определении свойств пород в полевых и лабораторных условиях. Структурно-текстурные особенности пород отражают условия формирования породы, определяют их свойства и особенности. Они отражают прежде всего неоднородность пород, которая обуславливает анизотропность в отношении водопроницаемости, сжимаемости, сопротивления сдвигу, определяющих поведение пород при возведении сооружений и устойчивость последних.

Е. М. Сергеев структурно-текстурные особенности пород подразделил на макро-, мезо- и микроструктуры и текстуры. Это деление в значительной мере условно, так как четких границ между выделенными типами нет. Выделение их определяется степенью видимости. К макроструктурным и макротекстурным особенностям относятся элементы, видимые невооруженным глазом. Структурные и текстурные признаки, которые устанавливаются при изучении пород под поляризационным микроскопом, относятся к мезоструктурным и мезотекстурным особенностям. С помощью электронного микроскопа и рентгенооскопии изучают микроструктурные и микротекстурные особенности.

Детально структуры горных пород изучаются в петрографии магматических и осадочных пород. Здесь мы рассмотрим только те особенности структур, которые имеют инженерно-геологическое значение. Влияние размера частиц было рассмотрено в гл. 4.

Структура пород с жесткими связями. Изучение структур пород с жесткими связями между зернами — магматических, метаморфических и сцементированных осадочных пород — с точки зрения оценки их как оснований обычных сооружений большого практического интереса не представляет, так как прочность этих пород в большинстве случаев вполне обеспечивает устойчивость сооружений. Прочность рассматриваемых пород обеспечивается крепкими, жесткими связями между зернами. Остальные структурные признаки этих пород интересны главным образом с точки зрения влияния на интенсивность и характер процессов выветривания, а некоторых осадочных сцементированных пород — с точки зрения влияния на процессы выщелачивания.

У *магматических пород* физико-механические свойства часто зависят от размеров кристаллов, слагающих их минералов, а также от степени раскристаллизованности породы. Как правило, мелкокристаллические, хорошо раскристаллизованные породы имеют большую прочность и устойчивость в отношении выветривания, чем породы того же минералогического состава, но более крупнокристаллические и более слабо раскристаллизованные. Поэтому все структуры магматических пород (см. табл. 9) подразделяются прежде всего по зернистости и степени раскристаллизованности.

Большое влияние на свойства магматических — интрузивных (глубинных) пород оказывают структуры, обусловленные взаимным прорастанием минералов (характерны для пегматитов). Такие структуры значительно повышают прочность пород.

Среди эффузивных пород следует выделять структуры, обусловленные различным содержанием стекловатого вещества, увеличение количества которого снижает прочность породы и ее сопротивление выветриванию.

В *осадочных сцементированных породах* структуры выделяются по крупности и форме зерен, слагающих породу. Наибольшей прочностью при одинаковом типе цемента отличаются породы тонко- и мелкозернистой структуры. Породы крупнозернистые и разнотекстурные быстрее разрушаются при выветривании и обладают меньшей механической прочностью. Прочность этих пород зависит главным образом от характера и типа цемента (табл. 11 и 12).

Структура песчаных и крупнообломочных пород. Среди рыхлых обломочных несцементированных пород структуры различают в зависимости от размера слагающих их зерен и степени однородности и отсортированности.

Основная структура песков называется *псаммитовой*. В зависимости от преобладающего размера частиц, слагающих пески, псаммитовые структуры подразделяются на псаммитовые крупнозернистые, среднезернистые, мелкозернистые и тонкозернистые.

Основные типы структур магматических пород

Название структур	Отличительные признаки	Влияние структуры на прочность породы
<p>Полнокристаллическая:</p> <p>1) крупнозернистая</p> <p>2) среднезернистая</p> <p>3) мелкозернистая</p> <p>4) афонитовая</p> <p>Равномернозернистая</p>	<p>Полная раскристаллизация породы, стекловатое вещество отсутствует. Размеры кристаллов больше 5 мм</p> <p>Размеры кристаллов 2—5 мм</p> <p>Размеры кристаллов 2—0,2 мм</p> <p>Размеры кристаллов 0,2 мм</p> <p>Кристаллы не видны невооруженным глазом</p> <p>Кристаллы всех главных минералов имеют близкие размеры</p>	<p>Характеризуются большой прочностью и устойчивостью против выветривания. Наиболее прочные породы с афонитовой и тонкозернистой структурами</p>
<p>Полустекловатая</p> <p>Стекловатая</p>	<p>В породе наряду с кристаллами содержится стекловатое вещество</p> <p>Порода состоит из аморфного вещества, кристаллы отсутствуют</p>	<p>Прочность меньше, чем у полнокристаллических. Она уменьшается по мере увеличения содержания стекла. В этом же направлении уменьшается сопротивление выветриванию</p>
Порфириовидная	<p>Отдельные, выдающиеся, наиболее крупные и хорошо образованные кристаллы расположены в полнокристаллической основной массе, которая может быть разной зернистости, вплоть до крупнозернистой</p>	<p>Породы с разномасштабной основной массой характеризуются большей прочностью, нежели породы того же состава, но обладающие неравномерной зернистостью основной массы</p>
Горфирровая	<p>Отдельные крупные кристаллы расположены в полностью или частично раскристаллизованной или стекловатой основной массе</p>	<p>Прочность и сопротивление выветриванию уменьшаются по мере увеличения содержания стекловатой массы</p>
Пегматитовая	<p>Крупные кристаллы одного минерала прорастают одинаково ориентированными кристаллами другого минерала</p>	<p>Оба типа структур обуславливают высокую прочность породы</p>
Мирмекитовая	<p>Прораствание червеобразными образованиями кварца кристаллов полевых шпатов</p>	

Основные типы структур метаморфических пород

Название структур и пород, для которых они характерны	Основные признаки структур	Влияние на свойства пород
Гранобластовая (гнейсы, амфиболиты, кварциты)	<p>Более или менее одинакового размера зерна, форма которых может быть различной</p>	<p>Обуславливает высокую прочность породы</p>
Роговиковая (роговики контактовые)	<p>Мелкие, с прочными правильными очертаниями кристаллы, плотно прилегающие друг к другу</p>	<p>То же</p>
Зубчатая или сутурная (кварциты, мраморы и др.)	<p>Кристаллы имеют неправильные зубчатые очертания</p>	<p>Обуславливает высокую прочность</p>
Милонитовая (милониты)	<p>Среди тонкоперетертого поляризуемого материала содержатся обломки кристаллов исходной породы, которая была сильно раздроблена и перетерта под большим давлением</p>	<p>Обуславливает высокую плотность и прочность</p>
Лепидопластовая (слюдяные, хлоритовые и другие сланцы)	<p>Преобладающие минералы развиты в виде чешуйчатых или пластинчатых кристаллов, ориентированных в одном направлении</p>	<p>Придает породам мягкость и меньшую прочность. Отличается слабой устойчивостью к выветриванию. Обуславливает анизотропность физико-механических свойств пород</p>
Волокнистая (серпентиниты, кровельные сланцы и др.)	<p>Тонкие волокна минералов вытянуты линейно в одном направлении</p>	<p>Обуславливает слабую прочность, резкую анизотропность и сильную выветриваемость</p>

В зависимости от степени однородности частиц структура песков может быть псаммитовой равнозернистой или неравнозернистой.

Для крупнообломочных пород (гравий, галечник) характерны *псефитовые структуры*. Они в зависимости от размера зерен, однородности и плотности сложения могут быть крупнозернистыми, плотными, рыхлыми т. д.

Породы с крупнозернистой структурой характеризуются лучшей водопроницаемостью и более высокими механическими свойствами в части сопротивления внешним усилиям. По мере уменьшения раз-

меров зерен уменьшается водопроницаемость и ухудшаются механические свойства.

При оценке влияния структур этих пород на их свойства необходимо учитывать также плотность сложения и наличие глинистых примесей. Так, порода псефитовой структуры или песок крупнозернистой структуры, но плотного сложения и с примесью глины может оказаться менее водопроницаемым, чем чистый, хорошо отсортированный песок мелкозернистой структуры рыхлого сложения.

Таблица 11

Основные структуры цементированных обломочных пород

Название групп структур	Название основных структур	Отличительные признаки	Влияние на свойства пород
Псефитовые	Галечная	Свойственна конгломератам: характерны окатанные зерна размером от 10 до 100 мм	Свойства и устойчивость, кроме размера зерен, зависят от их минералогического состава, характера и типа цемента
	Гравийная	Свойственна гравелитам. Характерны окатанные зерна размером от 2 до 10 мм	
	Щебневая	Наблюдается в брекчиях и дресвяниках. Характерна неокатанная форма зерен диаметром 10—100 мм (щебень) и 2—10 мм (дресва)	
	Дресвяная		
Псаммитовые	Крупнозернистая	Наблюдается в песчанниках при размере зерен 2—0,5 мм	Свойства и устойчивость пород, кроме размера зерен, зависят от минералогического состава зерен, характера и типа цемента
	Среднезернистая	0,5—0,25 мм	
	Мелкозернистая	0,25—0,1 мм	
Алевритовые	Крупноалеволитовая	Характерна для алевролитов с размером зерен 0,1—0,05 мм	Неустойчивы к выветриванию: в сухом состоянии — твердые, при увлажнении становятся мягкими, набухают в воде, размокают иногда до полной потери связности
	Мелкоалеволитовая	Характерна для алевролитов с размером зерен 0,05—0,005 мм	
	Пелитовая	Свойственна для аргиллитов и уплотненных глин	

Таблица 12

Основные структуры карбонатных пород (по форме зерен)

Тип структур	Петрографические особенности	Влияние типа структуры на свойства пород
Идиоморфная	Большинство зерен в породе представлено правильно образованными кристаллами	Прочность пород одинакового состава при прочих равных условиях изменяется в зависимости от размеров кристаллов — крупнозернистые карбонатные породы имеют меньшую прочность и легче разрушаются при выветривании
Гипидиоморфнозернистая	Большинство кристаллов имеет неправильную форму и лишь часть зерен представлена правильно образованными кристаллами	Прочность небольшая. Изменяется в зависимости от состава пород
Аллотриоморфная	Большинство кристаллов имеет неправильную и различную форму (агатую, игольчатую, пластинчатую и др.)	
Замещения	Один минерал замещает другой, принимая при этом его форму. Например, ромбоэдри доломита замещают раковины или зерна кальцита	Как правило, увеличивает прочность породы
Коррозии	Зерна имеют неправильную форму разъедания	Снижает прочность
Перекристаллизации	Микрозернистая часть породы перекристаллизована, в результате чего наблюдается частичное замещение крупнозернистыми кристаллами, которые создают причудливый узор	Увеличивает прочность

Структуры глинистых пород. Детально изучались М. Ф. Викуловой (1948, 1957), которая выделила следующие основные типы микроструктур глинистых пород.

1. *Пелитовая структура.* Порода состоит главным образом из глинистых частиц. Она характерна в основном для пород морского происхождения, встречается также среди глин лагунного и озерного происхождения.

2. *Алевропелитовая структура* отличается тем, что в основной массе глинистых частиц содержится 8—10 и более процентов алевроитовых (пылеватых) частиц угловатой, реже округлой формы. Характерна для большинства глинистых пород водного происхождения.

3. *Псаммопелитовая структура.* В основной массе глинистых частиц кроме алевроитовых содержится 8—10 и более процентов песча-

ных частиц. Эта структура свойственна большинству глинистых пород континентального происхождения.

4. *Фитопелитовая структура.* Характерна для глинистых пород, у которых в основной массе глинистые частицы, окрашенной в темные тона, наблюдаются различные растительные остатки. Наиболее часто она встречается в болотных, озерных и аллювиальных глинистых породах.

5. *Алевритовая структура.* Присуща главным образом пылеватым породам эолового происхождения (лессам и лёссовидным породам). Иногда встречается в делювиальных, пролювиальных и аллювиальных глинистых породах. Порода состоит в основном из алевритовых (пылеватых) частиц с небольшой примесью глинистых.

Из макроструктур в глинистых породах выделяются следующие.

1. *Конгломератовидная.* Округлые обломки глинистой породы сцементированы глинистыми частицами той же породы.

2. *Брекчиевидная.* Аналогична конгломератовидной макроструктуре, отличается тем, что крупные обломки имеют неправильную остроугольную форму.

Конгломератовидная и брекчиевидная структуры характерны главным образом перемытым, переотложенным глинам пролювия, делювия, оползневого делювия.

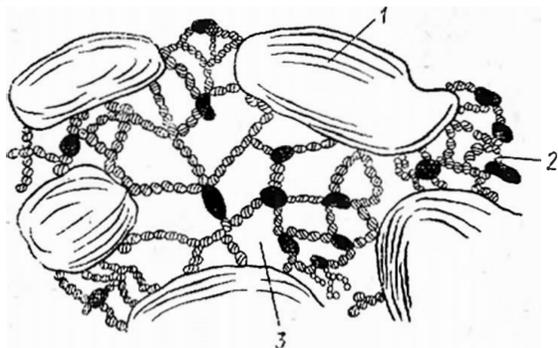


Рис. 10. Сложная неоднородная микроструктура глинистых пород:

1 — крупные частицы; 2 — мелкие частицы в микроагрегатах; 3 — поры

3. *Порфириовидная макроструктура.* Наблюдается в глинистых породах ледникового происхождения (морена). Порода в основном состоит из глинистых, пылеватых и песчаных частиц, среди которых встречаются разных размеров валуны, гальки, гравий, щебенка и другие крупные обломки.

В глинистых породах наряду с элементарными тонкодисперсными частицами очень часто содержатся комплексные сложно построенные частицы, образующиеся в результате соединения элементарных тонкодисперсных частиц (коллоидных). Эти относительно крупные сложные элементы называют *агрегатами*.

Микроструктура глинистых пород может изменяться под влиянием физико-химических процессов (коагуляция, пептизация, явление

поглощения, растворение) и механического уплотнения и сдвига. В зависимости от этих причин агрегаты могут возникать, изменяться и исчезать. При этом более устойчивыми оказываются крупные частицы (песчаные и пылеватые), которые образуют скелет микроструктуры. Коллоидные и глинистые частицы наиболее подвижны, они легко меняют свое расположение в породе, переходя под влиянием различных факторов в скоагулированное (укрупненное) или пептизированное (диспергированное) состояние.

Глинистые породы с микроагрегатной структурой во влажном состоянии обычно сильно сжимаются под статической нагрузкой. Динамические нагрузки — вибрация и сотрясение — практически не оказывают влияния на породы с агрегатной структурой, несмотря на их высокую пористость. Эта особенность объясняется наличием связей между частицами, образующими каркас и препятствующими передвижению частиц друг относительно друга при встряхивании.

Наличие микроагрегатов Е. М. Сергеев рекомендует использовать для выделения мезоструктур в глинистых породах.

По микроагрегатности выделяют: песчано-микроагрегатную, пылеватую-микроагрегатную и микроагрегатную мезоструктуры.

Песчано-микроагрегатная мезоструктура характеризуется тем, что глинистые и пылеватые частицы образуют микроагрегаты, которые связаны с песчаными зернами, содержание которых превышает 45%.

Пылеватую-микроагрегатную мезоструктуру отличается тем, что агрегаты из глинистых частиц связаны с пылеватыми зернами, содержащимися в породе в значительных количествах.

При *микроагрегатной мезоструктуре* основная масса породы состоит из агрегатов глинистых частиц.

Мезоструктуры оказывают большое влияние на свойства пород. Например, породы с микроагрегатной мезоструктурой характеризуются большей сжимаемостью, чем породы с песчано-микроагрегатной мезоструктурой.

Структура почв. Для почв наиболее характерны макроструктуры, выделяемые по форме и размерам отдельностей. Наиболее типичными и распространенными типами макроструктур почв являются: глыбовая, комковатая, ореховидная, слоистая, столбчатая, плитчатая, сланцеватая, листовая и чешуйчатая (рис. 11).

Глыбовая макроструктура — почва сложена остроугольными отдельностями неправильной формы (рис. 11, 1).

Комковатая макроструктура отличается от глыбовой меньшим размером макроструктурных отдельностей (рис. 11, 2).

Ореховидная макроструктура представлена округлыми отдельностями со сглаженными углами (рис. 11, 3).

Слоистая макроструктура характеризуется прослойками мощностью от сантиметров до метров (рис. 11, 4).

Столбчатая макроструктура — почва состоит из отдельностей, резко вытянутых по вертикали (рис. 11, 5).

Плитчатая макроструктура — почва сложена отдельностями, имеющими форму плит (рис. 11, 6).

Сланцеватая макроструктура — почва сложена отдельностями, которые отличаются от плитчатых меньшими размерами (не более $4 \times 5 \times 0,5$ см) (рис. 11, 7).

Листовая макроструктура — размер отдельностей не превышает по толщине 1—3 мм, а по длине и ширине 1—0,5 см (рис. 11, 8).

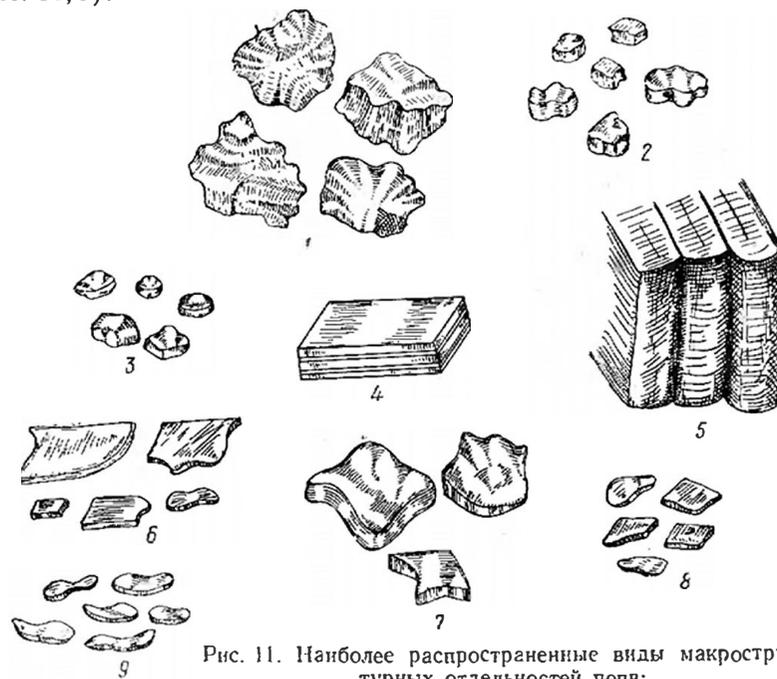


Рис. 11. Наиболее распространенные виды макроструктурных отдельностей почв:
1 — комковатая; 2 — ореховидная; 3 — столбчатая; 4 — слоистая; 5 — плитчатая; 6 — чешуйчатая; 7 — сланцеватая; 8 — листоватая; 9 — чешуйчатая

Чешуйчатая макроструктура — размер отдельностей по толщине около 1 мм, длине — до 1 см и ширине — до 0,5 см (рис. 11, 9).

М. М. Филатов, изучая влияние макроструктур связных почвогрунтов, установил, что прочность образцов их, обладающих различной макроструктурой, неодинакова. Наибольшей прочностью обладают почвогрунты с плитчатой макроструктурой, наименьшей — с глыбовой и чешуйчатой макроструктурой.

От характера макроструктур зависят сопротивление почвогрунта сдвигу по различным направлениям, водопроницаемость, высота капиллярного поднятия и другие свойства.

Текстура пород

При инженерно-геологических исследованиях текстура должна рассматриваться как один из признаков, отражающих условия формирования породы, как показатель неоднородности и анизотропности свойств горных пород.

Изучение текстурных особенностей горных пород при инженерно-геологических исследованиях имеет три цели: 1) дать общую оценку прочности пород и ее изменчивости; 2) разработать порядок отбора проб пород для лабораторных исследований; 3) установить методику лабораторных исследований.

Текстурные особенности прямо влияют на сопротивление породы сжатию и сдвигу, определяют пути фильтрации воды через породы, а следовательно, оказывают влияние на такие процессы, как суффозия, растворение, выщелачивание и др., ослабляющие физико-механические свойства пород.

В целом текстуры всех пород могут быть разделены на две большие группы: с упорядоченным расположением материала породы и неупорядоченным. Первая характерна для большинства осадочных, метаморфических и для некоторых магматических пород. Эти текстуры вызывают резкую анизотропность водно-физических и механических свойств в различных направлениях. При неупорядоченном расположении материала свойства пород бывают, как правило, сходными во всех направлениях.

Текстуры магматических пород. В магматических породах в инженерно-геологических целях важно различать массивную, флюидальную, сланцеватую и пузыристую текстуры.

При *массивной текстуре* кристаллы расположены в полном беспорядке. Эта текстура в инженерно-геологическом отношении наиболее благоприятна, так как обеспечивает полную изотропность физико-механических свойств.

При *флюидальной текстуре* большинство кристаллов имеет параллельное расположение, и они как бы обтекают более крупные кристаллы. Эта текстура обуславливает четко выраженную анизотропность физико-механических свойств пород, снижает их устойчивость к выветриванию.

Сланцеватая или ленточная текстура характерна для пород, состоящих из кристаллов различной зернистости и минералогического состава. Участки различной зернистости и состава располагаются в виде взаимно параллельных полос. Породы, обладающие сланцеватой текстурой, отличаются большой анизотропностью физико-механических свойств и пониженной устойчивостью в отношении выветривания

Породы с *пузыристой текстурой* (главным образом эффузивные) имеют многочисленные округлые пустоты различного размера, обусловленные удалением газовых пузырей при застывании лавы.

Текстуры метаморфических пород. В метаморфических породах также выделяют несколько видов текстур.

Сланцеватая текстура характеризуется наличием параллельных плоскостей, в пределах которых кристаллы различных минералов, имеющих пластинчатую или чешуйчатую форму, расположены своими длинными гранями также параллельно друг другу. Свойственна она кристаллическим сланцам, обладающим резко выраженной анизотропностью физико-механических свойств. Наиболее ослабленными являются плоскости сланцеватости. При выветривании по-

роды со сланцеватой текстурой легко распадаются по плоскостям сланцеватости на тонкие плитки.

Гнейсовидная текстура отличается параллельной ориентировкой большинства кристаллов или слоистостью, обусловленной чередованием в породе линз и полосчатых участков, образованных минералами различного состава и структуры. Характерна для гнейсов, мигматитов, амфиболитов. Обуславливает некоторую анизотропность физико-механических свойств. Однако в общем породы с гнейсовидной структурой обладают высокой прочностью.

Очковая текстура обусловлена наличием «очков» — пятен, образованных одним или несколькими крупными кристаллами, расположенными в плоскости сланцеватости и «обтекаемыми» тонкозернистой массой породы. Присуща гранитогнейсам, занимающим по анизотропности и прочности промежуточное положение между породами со сланцеватой и гнейсовидной текстурами.

Площчатая текстура характерна для филлитов. Вся порода смята в мелкие складки. Такая текстура значительно снижает прочность пород и обуславливает их слабую устойчивость по отношению к выветриванию.

Текстуры осадочных сцементированных пород. Текстуры осадочных сцементированных пород различаются по расположению зерен и по наличию и размеру пор.

По расположению зерен выделяют беспорядочную, микро- и макрослоистые текстуры.

Беспорядочная текстура отличается беспорядочным расположением зерен, без всякой ориентировки. При прочих равных условиях беспорядочная текстура обуславливает наибольшую прочность и устойчивость породы по отношению к выветриванию, анизотропность физико-механических свойств и снижение фильтрационной способности породы.

В породах с **макро- и микрослоистыми текстурами** (макрослоистая, горизонтально-микрослоистая, косомикрослоистая, площадчато-микрослоистая и др.) частицы располагаются ориентированно или собраны в одинаково ориентированные макро- или микрослои, иногда собранные в мельчайшие складки (плотность). Слоистые текстуры обуславливают четко выраженную анизотропность физико-механических свойств. Прочность в направлении слоистости обычно значительно меньше, чем в направлении, перпендикулярном слоистости; фильтрационная способность изменяется в обратном направлении. При прочих равных условиях породы со слоистыми текстурами выветриваются быстрее пород с массивной текстурой. При выветривании породы со слоистой текстурой легко распадаются на плитчатую и листоватую щебенку.

Для осадочных пород в природных условиях залегания, в массивах наиболее характерна макрослоистая текстура. По наличию и размеру пор также выделяют несколько видов текстур.

1. **Плотная текстура**, характерная для пород, лишенных пор, различимых невооруженным глазом и при слабых увеличениях под лупой или микроскопом. Обуславливает изотропность свойств, вы-

Типы цемента в осадочных сцементированных породах

Тип цемента	Особенности петрографического состава цемента	Прочность цементации
<i>По строению</i>		
Беспорядочный разнородный полимиктовый	Состоит из алевритовых и пелитовых частиц разного состава	Прочность цементации может быть различной, но резко возрастает в случае перекристаллизации его частичек Цементация прочная
Аморфный мономинеральный	Состоит из одного опала или железа, или другого вещества	При кальцитовом цементе порода прочная, при глинистом — слабая
Беспорядочный зернистый	Скопление кристаллических зерен одного минерала, чаще всего кальцита или реже глинистого вещества	Цементация прочная
Обрастания или крустификационный	Зерна цемента (кальцитового, халцедонового, фосфоритового и др.) обрастают зерна породы или стенки пор	Придает породе очень большую прочность
Нарастания или регенерации	Наблюдается в породах с одинаковым составом зерен породы и цемента. Зерна породы разрастаются за счет цемента	Цементация прочная
Прорастания или пойкилитовый	Цемент по составу гипсовый или кальцитовый кристаллизуется как один кристалл и включает в себя зерна породы	Прочность цементации зависит от преобладающего типа цемента
Смешанный	Порода сцементирована различными типами и составами цемента	
<i>По взаимоотношению с зернами породы</i>		
Контактный	Цемент развит лишь в местах соприкосновения зерен между собой	Как правило, цементация непрочная, за исключением случаев, когда цемент представлен кремнеземом или кварцем (вторичным) у пород, подвергшихся большому давлению
Цемент пор	Выполняет промежутки между зернами	Прочность различная и зависит от состава цементирующего вещества. Наиболее слабая — при цементации глиной, прочная — при цементации кремнеземом или кварцем
Коррозонный	Цемент выполняет промежутки между порами и заходит внутрь отдельных зерен по зазубринам на их поверхности, получившимся вследствие растворения или замещения зерен	Обеспечивает очень прочную цементацию
Базальный	Зерна не соприкасаются между собой и как бы погружены в цемент — «плавают»	Прочность цементации разная и зависит от состава цементирующего вещества

сокую прочность и весьма слабую фильтрационную способность, иногда практически — водонепроницаемость.

2. *Пористые текстуры* характеризуются наличием пор — мелкопористая диаметром меньше 5 мм и крупнопористая — более 5 мм. Пористые текстуры при прочих равных условиях обуславливают снижение прочности породы и увеличение водопроницаемости, при этом последняя возрастает по мере увеличения размеров пор. В растворимых породах поры способствуют быстрому проникновению подземных вод в породу, что приводит к выщелачиванию и развитию процессов карстообразования.

Большое значение при оценке влияния текстур на физико-механические свойства цементованных пород имеет изучение характера цемента. В табл. 13 приведены наиболее распространенные типы цементов и указано влияние их на прочность пород.

Текстуры рыхлых обломочных пород. В группе крупнообломочных пород (гравий, галечник, щебень и др.) наиболее характерными текстурами являются бутовая и псевдопорфировая текстура крупнообломочных пород (рис. 12, А) и слоистые текстуры песков (рис. 12, Б).

Бутовая текстура (рис. 12, а) отличается тем, что крупные обломки, слагающие основную массу породы, непосредственно опираются друг на друга, в результате чего вся порода приобретает механическую жесткость и прочность. Фильтрационная способность пород с такой текстурой зависит от степени

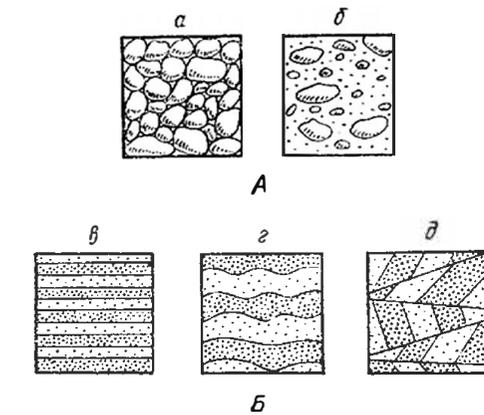


Рис. 12. Характерные текстуры крупнообломочных несвязных пород (А) и песков (Б):

а — бутовая; б — псевдопорфировая; в — горизонтально-слоистая; г — волнистая; д — косо-слоистая

заполнения промежутков между крупными обломками более мелкозернистым материалом и от характера этого материала (песчаный, глинистый).

Псевдопорфировая текстура (рис. 12, б) характеризуется тем, что отдельные крупные обломки включены в основную массу породы, представленную более мелкозернистым материалом. Свойства таких пород могут изменяться в больших пределах в зависимости от состава и характера основного материала. Например, при глинистом составе основной массы породы она будет обладать весьма ничтожной водопроницаемостью, а при песчаном или гравийном материале весьма значительной. При глинистом составе основной массы породы с псевдопорфировой текстурой сопротивление сдвигу будет меньше, чем сопротивление сдвигу породы с такой же текстурой, но при песчаном или гравийном составе основной массы.

В крупнообломочных породах выделяются также разные виды косослоистой и беспорядочной текстуры. Свойства пород с такими текстурами весьма различны и зависят от преобладающего гранулометрического состава породы, характера слоистости, наличия переслаивания глинистых и обломочных пород и т. д.

В песках наиболее часто наблюдаются различные слоистые текстуры. На рис. 12, в, г, д приведены некоторые разновидности этих текстур.

Инженерно-геологическая оценка текстур песков имеет важное практическое значение. П. И. Фадеев указывает, что изучение текстур песчаных пород позволяет устанавливать степень и характер различия в свойствах песчаных пород, слагающих отдельные слои; обеспечивает возможность выявления наиболее ослабленных участков в толще песков, по которым возможны нарушения устойчивости (контакты между отдельными слоями, имеющие одинаковое направление с действующей на породу нагрузкой, тонкие глинистые прослои в толще песков и т. д.); позволяет разрабатывать рациональные способы закрепления толщи песков путем инъекции закрепляющих растворов.

Текстуры песков необходимо изучать также при оценке устойчивости массивов песков, вскрываемых котлованами, карьерами, выемками и другими горными выработками.

Текстуры глинистых пород. Текстуры глинистых пород, как и других осадочных пород, обусловлены взаимным расположением в пространстве слагающих породу элементов. Некоторые текстурные особенности глин связаны с различной окраской. Глинистые породы характеризуются большим разнообразием текстур.

М. В. Видулова разработала классификацию микро- и макротекстур глин. Она выделяет следующие текстуры.

1. Текстуры, вызванные взаимным расположением в пространстве частиц разного размера. К этим текстурам относятся различного рода слоистые текстуры, скрытослоистые, гнездовидные, чешуйчатые, хлопьевидные, хаотические и другие текстуры, образование которых связано главным образом с различными условиями отложения глинистых осадков.

2. Текстуры, связанные с периодическим высыханием глинистого осадка, — сетчатые и полигональные.

3. Текстуры, связанные с различной степенью уплотнения пород, — пористые и сплошные (монокристаллические).

4. Текстуры неправильные, обусловленные нарушениями залегания глинистых осадков, к ним относятся плейчатые текстуры, а также текстуры, возникшие в результате жизнедеятельности роющих животных.

5. Текстуры сланцеватые, возникшие под влиянием высоких давлений в процессе диагенеза.

Описанные типы текстур влияют на свойства пород и их поведение под сооружениями, поэтому они должны изучаться при инженерно-геологическом изучении пород и учитываться при отборе образцов (монокристаллов) для лабораторных исследований.

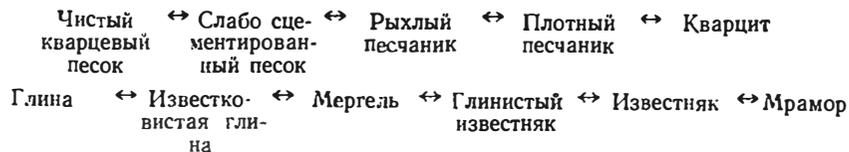


Таблица 14

Разделение пород по характеру структурных связей

Группа пород	Тип структурных связей	Характерные свойства	Примеры типичных пород
С жесткими связями между зернами	Кристаллизационные	Прочность очень высокая и высокая. Твердые связи необратимые — при разрушении естественным путем не восстанавливаются. Практически несжимаемы. Невлагоемки. Водопроницаемость зависит от степени трещиноватости. Большей частью стойки против растворения, не размокают и не размываются	Гранит, базальт, кварцит, мрамор
	Цементационные	Прочность и водостойкость зависят от состава цемента. При кремнеземном и кварцевом цементе прочность высокая, породы с таким цементом не размокают; при глинистом цементе прочность небольшая; порода размокает. Водопроницаемость зависит от степени трещиноватости. Связи необратимые	Известняки, песчаники, конгломераты
Глинистые отвердевшие	Цементационные (кристаллизационно-конденсационные)	Прочность относительно невысокая, связи необратимые. Водостойкость невысокая, в большинстве случаев размокают в воде, набухают	Аргиллиты, алевролиты, глинистые сланцы, мергели
Глинистые	Коллоидные	Прочность невысокая, при увлажнении уменьшается и иногда доходит до нуля. Связи обратимые — при разрушении могут восстанавливаться. В зависимости от степени влажности могут находиться в твердом, пластичном и текучем состояниях. Сильно сжимаемы. Сопротивление сдвигающим усилиям низкое. Сильно влагоемки. Практически водонепроницаемы. Стойкость против растворения различная. Размокают, набухают и дают усадку	Различные глины, суглинки, супеси
Обломочные нецементированные	Отсутствуют	Прочность высокая и средняя, зависит от минералогического состава и крупности зерен. Слабо сжимаемы, сопротивление сдвигу высокое и увеличивается с увеличением размера зерен. Хорошо водопроницаемы, фильтрационные свойства увеличиваются также с увеличением размера зерен	Пески, гравий, галечники

Сложение

Для улучшения естественных связей разработан ряд мелиоративных мероприятий, позволяющих улучшать или создавать заново связи в слабых породах (глинизация, известкование, битумизация, силикатизация, цементация, замораживание).

Количественная оценка влияния структурных связей на прочность пород производится путем сравнительного изучения пород на образцах с нарушенным и ненарушенным природным сложением.

С точки зрения оценки свойств пород очень важно изучать их сложение, характеризующееся степенью плотности и нарушенности естественной структуры, текстуры и влажности.

Под *естественным сложением* понимается такое состояние породы, такое расположение слагающих ее элементов, которое возникло в процессе ее формирования без нарушения структурных связей и природной влажности.

Сложение породы определяет ее физическое состояние, под которым прежде всего следует понимать степень уплотненности и степень влажности. Нарушение естественного сложения — взаимному ступени плотности, степени влажности и изменению физического состояния, т. е. приводит к изменению свойств породы. Например, пески рыхлого сложения характеризуются неустойчивым положением зерен, большой сжимаемостью, малым сопротивлением сдвигу, высокими фильтрационными свойствами. Под действием вибрации они могут быстро уплотняться, в результате чего происходят внезапные и иногда катастрофические осадки сооружений, построенных на таких породах.

Рыхлые пески в водонасыщенном состоянии могут легко переходить в подвижное — плавунное состояние под влиянием сотрясения при землетрясениях, при взрывах или от вибрации под фундаментами машин. Такое внезапное разжижение песков может вызвать различные неблагоприятные инженерно-геологические процессы: оплывины, оползни, оседания насыпей железных дорог, осадки зданий и сооружений. Пески того же минералогического состава и размера зерен, но плотного сложения обладают устойчивым положением зерен, сжимаются слабо, отличаются повышенным сопротивлением сдвигу и характеризуются низкими фильтрационными свойствами. Плотные водонасыщенные пески могут переходить в плавунное состояние только после их разжижения.

Нарушение естественного сложения связных — глинистых грунтов также приводит к резкому изменению их состояния и свойств. Они теряют свою устойчивость при большой влажности; при нарушении естественного сложения могут переходить из полутвердого состояния в мягкое — пластичное или даже жидкое — текучее состояние с полной потерей прочности. Вот почему при инженерно-геологическом изучении пород надо обязательно учитывать их сложение и состояние и назначать методику испытания пород в зависимости от намеченного их использования: если изучаемая порода

Генетические типы трещин (по Л. И. Нейштадт)

Типы трещин	Приуроченность трещин	Основные морфологические признаки	Влияние на свойства пород
Первичной отделимости	В магматических породах	Располагаются параллельно и перпендикулярно поверхности охлаждения и разбивают породу на кубическую, параллелепipedальную и призматическую отдельности	Ослабляют массив породы. Обуславливают водопроницаемость. Уменьшают сопротивление сдвигающим усилиям
	В осадочных породах	Наклонные и извилистые, часто пересекаются и разбивают породу на многогранники в виде призм. В карбонатных породах возникают при доломитизации и раздоломничивании. Стенки трещин сглаженные, местами бугристые из-за выступающих кристаллов	
Напластованности	В осадочных породах	Связаны с процессами седиментации и диагенеза осадков. Возникают на границе слоев разного литологического состава или внутри слоя в результате различного реагирования породы на нагревание, охлаждение, окисление, гидратацию и давление. В песчаниках и конгломератах образуют толстоплитчатую отдельность, в алевролитах — тонкоплитчатую	Оценку трещин напластованности нужно делать применительно к конкретному петрографическому типу пород, учитывая условия их залегания. Особенно развиты они бывают в карбонатных породах, где обуславливают высокую водопроницаемость. Представляют опасность в случае падения пластов пород в направлении склонов долин, так как способствуют возникновению оползней
Тектонические	Связанные с зонами тектонических перемещений (параклазы)	Связаны со сжатием, реже с растяжением земной коры. Подразделяются на трещины сбросов, взбросов и сдвигов. Имеют очень гладкие стенки; в магматических породах секут крупные кристаллы, в конгломератах — гальку; прослеживаются на очень большую глубину, пересекают породы различного состава	Трещины очень неблагоприятны: 1) они часто зияющие и прослеживаются на большую глубину, обуславливают большую фильтрацию в карбонатных породах, с ними часто связано карстообразование; 2) к тектоническим трещинам этого типа приурочены зоны интенсивного дробления и милонитизации, поэтому эти породы неустойчивы к выветриванию, которое вызывает снижение их несущей способности
	Не связанные с зонами тектонических перемещений	Трещины узкие, кипиллярные, объединяются в четко выраженные системы. Кливаж — система частых параллельных трещин, удаленных одна от другой на расстояние не более 3 см, не совпадаю-	Трещины этого типа не намного повышают водопроницаемость. Способствуют выветриванию пород и резко снижают их несущую способность

будет служить естественным основанием или средой для какого-либо сооружения, ее свойства должны изучаться при условии сохранения естественного сложения и физического состояния на монолитных образцах или в массиве в условиях естественного залегания; если же изучаемая порода будет использоваться в качестве строительного материала при возведении земляных сооружений (дамб, плотин, дорожного полотна и т. д.), исследование ее следует производить на образцах с нарушенным сложением, но при той степени влажности и плотности, с которыми она будет укладываться в сооружение, или в состоянии оптимальной влажности, при которой данная порода будет иметь наибольшую плотность.

Указанная зависимость находит отражение в действующих Строительных нормах и правилах, по которым величина нормативного давления на песчаные и глинистые породы определяется в зависимости от плотности их сложения и степени влажности.

Трещиноватость пород

Наличие трещин в горных породах, особенно в породах с жесткими связями, является важным фактором, определяющим состояние породы и ее свойства. Трещины нарушают монолитность породы, расчленяют ее на различные отдельности, определяют направление ослабленных зон, пути движения подземных вод, наиболее вероятные подвижки массивов и отдельных блоков пород в откосах и горных выработках. Трещины влияют на прочность и устойчивость пород, их газопроницаемость, водопроницаемость, степень обводненности и разрабатываемость пород, на проходку буровых скважин; степень и характер трещиноватости, определяют организацию производства строительных работ и горно-геологические условия разработки месторождений полезных ископаемых. Поэтому изучение трещиноватости горных пород является важной составной частью общего комплекса полевых и лабораторных исследований для оценки физико-механических свойств породы, прогноза возникновения инженерно-геологических процессов при взаимодействии пород с сооружениями, для правильного отбора образцов и лабораторных исследований и назначения методики этих исследований, а также для разработки мероприятий по улучшению свойств породы и составлению проектов организации строительных и горнопроходческих работ.

Изучение трещиноватости пород должно производиться как в процессе инженерно-геологической съемки (в массиве), так и при камеральных и лабораторных работах (в образцах и шлифах).

Для инженерно-геологической оценки трещиноватости необходимо прежде всего установить происхождение преобладающей системы трещин, так как от генетического типа трещин зависят особенности их (густота, преобладающее направление, глубина распространения, ширина, характер заполнителя), определяющие физико-механические свойства породы в образце и в массиве.

Основные генетические типы трещин и их краткая характеристика даны в табл. 15.

Типы трещин	Приуроченность трещин	Основные морфологические признаки	Влияние на свойства пород
	пород (диаклазы)	щих с первичной текстурой, а для осадочных пород — не совпадающих со слоистостью	
Выветривания	Разгрузки в склонах долин (трещины бортового отпора)	Образуются в бортовой части какого-либо вреза. Для них характерны большая ширина и криволинейные или ступенчатые очертания. С глубиной трещины сужаются Распространены в основном в поверхностной зоне и затухают с глубиной. Густой сетью покрывают породу. Для них характерны невыдержанность и извилистые очертания. Обычно расширяют трещины другого генезиса, но могут образоваться и в массивной породе	Представляют особенно большую опасность при гидротехническом строительстве, так как обладают большой водопроницаемостью и являются причиной обрушения берегов Определяют мощность зоны съема, глубины цементации и проведение других мероприятий по укреплению пород и проведению противοфильтрационных мероприятий

Л. И. Нейштадт предлагает следующую классификацию трещин по ширине:

Тонкие трещины	1 мм
Мелкие трещины	1—5 мм
Средние трещины	5—20 мм
Крупные трещины	20—100 мм
Очень крупные трещины	>100 мм

Одновременно с шириной трещин важное значение имеет изучение степени густоты трещин, т. е. насколько интенсивно порода разбита трещинами. Для количественной оценки трещиноватости пород Л. И. Нейштадт предложила пользоваться коэффициентом трещинной пустотности ($K_{тр}$), под которым понимается отношение площади трещин (в любой плоскости) к площади породы.

В зависимости от величины коэффициента трещинной пустотности различают следующие породы:

Породы	$K_{тр}$, %
Слаботрещиноватые	2
Средней трещиноватости	2—5
Сильнотрещиноватые	5—10
Очень сильнотрещиноватые	10—20
Исключительно сильнотрещиноватые	>20

Количественная оценка степени трещиноватости может быть произведена путем опытного нагнетания или налива воды в буровые скважины, пройденные в трещиноватых породах. При этом определяют величину удельного водопоглощения (q_n), под которым понимают величину поглощения воды в л/мин на 1 м испытуемого интервала при напоре 1 м. По величине q_n различают следующие породы:

Породы	q_n , л/мин
Сильнотрещиноватые	>1
Трещиноватые	0,5—1
Слаботрещиноватые	0,01—0,05
Практически нетрещиноватые	<0,01

О степени и характере трещиноватости можно судить по проценту выхода керна при бурении, а также по характеру керна, особенно при бурении большими диаметрами.

Трещиноватость пород можно изучать также геофизическими методами (электрокаротаж и ультразвуковой каротаж).

Более подробно трещиноватость горных пород и ее влияние на инженерно-геологические условия строительства различных сооружений рассматривается в курсе «Методика инженерно-геологических исследований».

Контрольные вопросы

1. Что понимается под структурой и текстурой в инженерной геологии?
2. Наиболее характерные структуры несцементированных пород, их особенности и как они влияют на инженерно-геологическую оценку этих пород.
3. На какие группы разделяются структуры глинистых пород и каковы особенности этих типов структур глинистых пород?
4. На какие группы разделяются текстуры горных пород?
5. Характерные текстуры глинистых пород.
6. Какое влияние оказывают текстуры глинистых пород на инженерно-геологическую оценку пород?
7. Характерные текстуры обломочных пород.
8. Какое влияние оказывают текстуры песчаных пород на устойчивость этих пород в естественных массивах?
9. Что такое структурные связи, как они подразделяются и какое влияние оказывают на свойства пород?
10. Как определить влияние структурных связей на прочность пород?
11. Сложение пород и его влияние на их свойства.
12. Трещиноватость и ее значение для оценки прочности и других свойств пород.

Литература

- Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Под ред. Е. М. Сергеева, С. Н. Максимова и Г. М. Березкиной. Т. 1. М., Изд-во МГУ, 1968, гл. 6, 11, 16, 18.
Рац М. В. и Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М., «Недра», 1970.
Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Знангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. II, § 1, 2 и 5.

Пустоты в горных породах заполняют газы и вода. Практически нельзя себе представить горную породу, которая не содержала бы того или иного количества воды и газов. Количественное соотношение воды и газа зависит от глубины залегания породы. Верхнюю часть земной коры можно разделить на две зоны. Верхняя зона характеризуется преобладанием в порах и пустотах горных пород различных газов и называется *зоной аэрации*. Нижняя зона, ниже уровня грунтовых вод, называется *зоной насыщения*; в этой зоне пустоты в горных породах заполнены преимущественно водой. Такое разделение весьма условно, так как нередко наблюдаются случаи полного насыщения породы водой в зоне аэрации и полного насыщения участков пород газами в зоне насыщения. Практически абсолютно сухих пород, насыщенных только газами, в природе почти не наблюдается. Чаще всего горные породы представляют собой трехфазные системы: минеральные частицы + вода + газы. В зависимости от преобладания того или иного компонента они условно могут считаться и двухфазными системами: минеральные частицы + вода или минеральные частицы + газы. Свойства таких горных пород и их поведение под сооружениями будут различными. Состояние породы в зависимости от соотношения скелета, воды и газов показано на рис. 13.

Газы в горных породах

Мощность зоны аэрации весьма различна и зависит от рельефа поверхности Земли и глубины залегания уровня грунтовых вод. В горных районах мощность зоны аэрации достигает сотен метров, в степных районах и на предгорных равнинах изменяется от нескольких метров до нескольких десятков метров, а на болотах и заболоченных пространствах либо равна нулю, либо не превышает нескольких десятков сантиметров. Мощность зоны аэрации изменяется по сезонам года и по годам от нескольких десятков сантиметров до многих метров в зависимости от закономерности колебаний уровня грунтовых вод района.

Газы в породе зоны аэрации проникают из атмосферы, поэтому состав их близок к составу атмосферного воздуха. Различие состоит в том, что в порах пород содержится значительно больше углекислоты и меньше азота и кислорода. В почвах и подстилающих их ма-

теринских породах происходят окислительные процессы с поглощением кислорода и азота и выделением углекислоты, поэтому содержание углекислоты в них может в сотни раз превышать ее содержание в атмосфере (сотые доли процента).

Кроме кислорода, азота и углекислоты в породах содержатся часто тяжелые углеводороды, метан и сероводород. Наибольшие скопления этих газов наблюдаются в сравнительно глубокозалегающих толщах земной коры.

Между атмосферой и породами зоны аэрации происходит постоянный газообмен. На газообмен, так же как на соотношение жидкой составляющей и содержание воздуха в порах грунта, влияет ряд факторов: колебание температуры, изменение барометрического давления, влажность атмосферного воздуха, ветер, атмосферные осадки, биохимические процессы и т. п.

Интенсивность газообмена между породами и атмосферой зависит от характера пород, их структуры, пористости, степени выветрелости и трещиноватости. В плотных монолитных породах газообмен затруднен. В структурных пористых, трещиноватых скальных и других породах с большими размерами пустот газообмен протекает интенсивно.

Кроме газов атмосферного происхождения в породах наблюдаются газы биохимического и химического генезиса. Для газов биохимического происхождения наиболее характерны метан и сероводород. Состав газов химического происхождения весьма разнообразен и зависит от характера химических реакций, в результате которых они образуются.

Газы в порах пород зоны аэрации могут находиться в свободном, легкоподвижном, связанном — адсорбированном и защемленном состоянии.

Газы, заполняющие поры пород, в свободном состоянии весьма подвижны, легко передвигаются в порах, участвуют в газообмене с атмосферой, могут вытесняться из пород подземными водами при повышении их уровня.

Адсорбированные газы связаны с поверхностью минеральных частиц горной породы и удерживаются на ней молекулярными силами. Количество адсорбированных газов зависит от минералогического состава породы, степени ее дисперсности и влажности. Наибольшей адсорбционной способностью по отношению к газам обладают тонкодисперсные породы с большим содержанием органических веществ. При увеличении влажности количество адсорбированных газов уменьшается, они вытесняются водой и уходят в атмосферу или образуют так называемые защемленные скопления газов (воздуха). Следует различать временное защемление газов в зоне аэрации и большие скопления газов в зоне насыщения, ниже уровня подземных вод.

Защемление газов (воздуха) в горных породах зоны аэрации наблюдается в капиллярной зоне и в зоне сезонного колебания уровня подземных вод. В результате сезонного колебания уровня подземных вод и капиллярной каймы над их уровнем воздух или

газы оказываются окруженными со всех сторон водой и изолированными от атмосферы.

Защемление больших объемов воздуха в зоне аэрации может происходить и в результате хозяйственной деятельности человека, например, при инфильтрации воды из каналов и водохранилищ, при создании подпора подземных вод водохранилищами, при поливах в районах орошаемого земледелия.

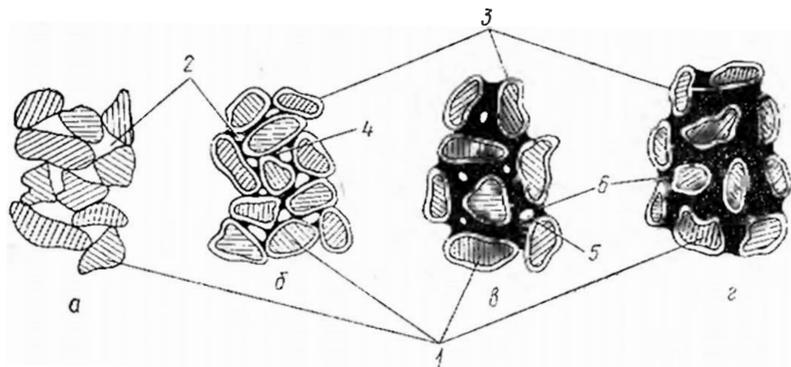


Рис. 13. Различное состояние породы в зависимости от соотношения в ее порах воды и газов:

а — абсолютно сухая порода; б — слабоувлажненная порода (скелет + воздух + защемленный воздух); в — порода, полностью насыщенная водой (скелет + вода); г — зерна породы (скелет); 2 — воздух в порах, свободно сообщающийся с атмосферой; 3 — пленки воды вокруг зерен породы (прочной и рыхлосвязанной воды); 4 — защемленная капиллярная и свободная вода; 5 — защемленные пузырьки воздуха; 6 — свободная и капиллярная воды, насыщающие породу

В зоне насыщения газы либо находятся в растворенном в воде (нефти) состоянии, либо в виде различных по форме скоплений (пузырьки, газовые мешки, залежи), изолированных от наружной атмосферы и находящихся под большим давлением (многие десятки, а порой и сотни атмосфер). Скопление нефтяных газов (смесь метана, этана, этилена и других углеводородов) может достигать очень больших размеров. Такие скопления газов имеют промышленное значение как сырье для химической промышленности и как топливо.

В инженерно-геологическом отношении газообразная составляющая в горных породах имеет большое значение, так как горные породы с газами (воздухом) в породах отличаются по своим свойствам от тех же пород, не содержащих газы. Кроме того, наличие в горных породах больших скоплений газов затрудняет проходку горных выработок и нередко является причиной катастроф при подземной разработке месторождений полезных ископаемых и особенно углей.

Наиболее сильно влияет содержание газов (воздуха) в порах на свойства глинистых пород. Прочность и другие свойства этих пород изменяются в зависимости от соотношения в порах жидкой и газообразной составляющих.

При относительно сухой породе и слабом увлажнении ее (рис. 13, а, б) в зоне аэрации воздух в порах породы свободно сооб-

щается с атмосферой, находится под нормальным давлением и при сжатии породы под внешней нагрузкой может легко и быстро выдавливаться по мере уменьшения объема пор и уходить в атмосферу.

При сильном увлажнении породы (рис. 13, в) большая часть пор занята водой и воздух находится в защемленном состоянии в виде изолированных пузырьков, окруженных водой. Он не сообщается с атмосферой и может находиться под давлением, превышающим атмосферное. При сжатии такой породы под внешней нагрузкой защемленный воздух воспринимает на себя часть внешней нагрузки и придает породе упругость.

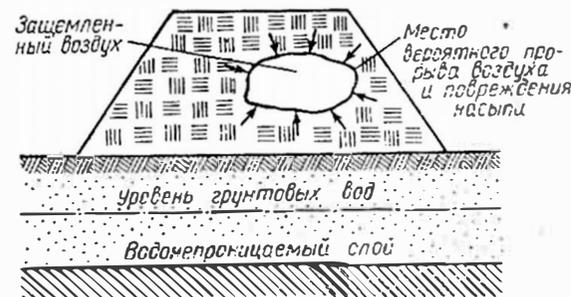


Рис. 14. Защемленный воздух в насыпи и его возможное влияние на ее деформацию

Защемленный воздух (газы) влияет не только на сжимаемость пород. Он уменьшает их водопроницаемость и теплопроводность. Наличие кислорода и углекислоты в породах способствует процессам химического выветривания, вызывая реакции окисления, карбонатизации и растворения — выщелачивания карбонатных пород. Газы оказывают агрессивное — разрушающее воздействие на подземные части сооружений и коммуникаций.

Газы биохимического происхождения, образующиеся в молодых илистых отложениях рек и озер, замедляют процесс естественного уплотнения этих осадков, поддерживая их в рыхлом, легкоподвижном состоянии и тем самым резко снижая их прочность, создавая значительные затруднения при строительстве мостов, набережных, причалов и других сооружений.

Защемленный воздух обуславливает осадки дорожных и других насыпей из глинистых пород. Осадки могут протекать продолжительное время и постепенно, по мере уменьшения объема защемленного воздуха. В некоторых случаях динамические нагрузки на насыпи с защемленным воздухом могут приводить к прорыву воздуха через откос и деформации насыпи (рис. 14).

Объем воздуха, содержащегося в породе, определяется путем сравнения общего объема пор в породе с той частью их, которая занята водой:

$$K_a = \frac{V_n}{V_w},$$

где K_a — коэффициент аэрированности.

Вода в горных породах

Вода присутствует в горных породах в различной форме и находится с ними в тесном взаимодействии. Практически нельзя себе представить какую-либо горную породу, в особенности рыхлую, которая не содержала бы того или иного количества воды в той или иной ее форме и агрегатном состоянии — твердом, жидком и газообразном.

Различные формы воды переходят друг в друга, изменяя при этом инженерно-геологические свойства пород. Особенно сильно влияние воды на свойства рыхлых — сыпучих и связных горных пород.

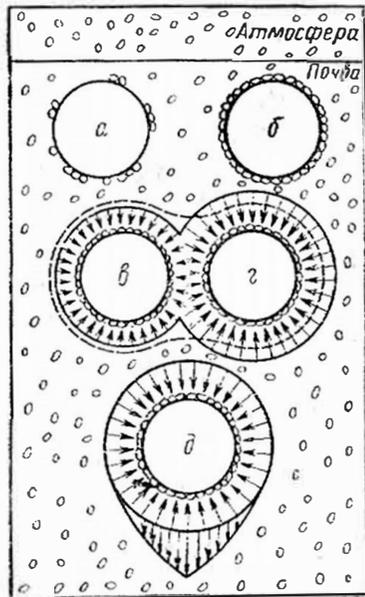


Рис. 15. Схема различных категорий воды по А. Ф. Лебедеву: 1 — частицы породы; 2 — молекулы воды; а — частицы с неполной гигроскопической влажностью; б — частицы с максимальной гигроскопической влажностью; в — частицы с пленочной водой; г — частицы с пленочной водой при максимальной молекулярной влагоемкости; д — частицы с гравитационной водой

Состояние и свойства воды в рыхлых (песчаных) породах подробно изучил А. Ф. Лебедев (1882—1936). Он различал в этих породах следующие категории воды:

1) кристаллизационная и химически связанная вода, входящая в состав минералов, образующих горные породы; 2) вода в форме пара в породах зоны аэрации; 3) гигроскопическая — пленочная вода, образующая на поверхности минеральных частиц пленки различной толщины, более или менее прочно связанные с поверхностью минерала; 4) свободная или гравитационная вода в жидком состоянии, заполняющая пустоты в горных породах и передвигающаяся в них под влиянием разности напоров; она подразделяется на собственно свободную воду и капиллярную воду; 5) вода в твердом состоянии, находящаяся в пустотах горных пород в виде льда (рис. 15).

А. Ф. Лебедев, ограничиваясь в своих опытах главным образом песками, не учитывал физико-химические процессы, протекающие при взаимодействии глинистых — коллоидных частиц с водой, не

рассматривал изменения свойств пород при их взаимодействии с водой и недостаточно анализировал природу и механизм удержания воды породами.

Работы советских ученых С. И. Долгова, Б. В. Дерягина, П. А. Ребиндера, А. И. Роде, В. А. Приклонского, В. Д. Ломтадзе и

Виды воды в горных породах (по В. Д. Ломтадзе)

Виды воды		Состояние породы по степени влажности (заполненные поровые)	Распространение видов воды	Подвижность воды	Силы, определяющие подвижность воды
Свободная	Гравитационная	Сильновлажная или влажная (полное или частичное, значительное)	Водоносные горизонты, зоны, комплексы	Легкоподвижная	Гравитационные
	Капиллярная		Зона капиллярного насыщения и увлажнения	Подвижная	Гравитационные и капиллярные
	Иммобилизованная		В породах слабоводопроницаемых и водонепроницаемых	Слабоподвижная	Гравитационные
Физически связанная	Вода поверхностных слоев	Слабовлажная (частичное или полное)	Зона аэрации. В других зонах в тонкодисперсных породах и микротрещинах любых пород	Малоподвижная	Сорбиционные — поверхностные на границе раздела твердой и жидкой фаз
	Адсорбированная вода			Трудноподвижная	
Парообразная	Свободно сообщающаяся с наземной атмосферой	Воздушно-сухая (отсутствует)	Зона аэрации	Подвижная	Разность упругости пара
	Защемленная в порах	Сильновлажная (значительное)	В любых горных породах в защемленном виде	Неподвижная	—
В твердом состоянии	В дисперсном состоянии	Мерзлая (частичное или полное)	В зоне деятельного слоя и многолетнемерзлых пород	Практически неподвижная	—
	В виде крупных кристаллов, скопленений, прослоек, слоев, жил, линз				

Примечание. Горные породы содержат также химически связанную (кристаллизационную, конституционную, цеолитную) и биологически связанную воду (в микроорганизмах, растениях, животных). Эти воды изучают минералогия, биология, биохимия и другие науки.

других позволили расширить представления А. Ф. Лебедева о воде в горных породах.

В. Д. Ломтадзе, специально изучая формы нахождения воды в горных породах в зависимости от их влажности, предложил новую схему видов воды в горных породах, отражающую степень подвижности различных категорий воды и силы, определяющие эту подвижность (табл. 16).

Современное состояние изученности воды в горных породах позволяет различать две основные категории воды в горных породах — *связанную* и *свободную*, резко отличающиеся по своим свойствам друг от друга и по-разному влияющие на свойства горных пород. Кроме того, весьма важно различать агрегатное состояние, в котором вода может находиться в пустотах горных пород: *твердое, жидкое и газообразное*.

В дальнейшем изложении автор придерживается следующего подразделения воды в породах по степени ее подвижности, характеру связи с горными породами и влиянию на состояние и свойства пород:

1. Связанная вода: а) химически связанная вода (вода, входящая в состав минералов), б) физически связанная вода (вода, связанная на поверхности минералов).

2. Вода, связанная капиллярными силами, — капиллярная вода (переходная между связанной и свободной водой).

3. Свободная вода.

Различные категории воды присутствуют в породах совместно, границы и соотношения между ними условны и изменяются в зависимости от целого ряда факторов: минералогического состава породы, степени ее дисперсности, химического состава воды и концентрации растворенных в ней веществ, температуры воды и породы, влажности и давления воздуха и др.

Связанная вода. Связанная вода содержится в горных породах в различных видах и формах и удерживается внутри минералов, слагающих породы, и на их поверхности силами, значительно превышающими силу тяжести.

Как уже было сказано выше, связанная вода разделяется на химически связанную воду, входящую в состав минералов, и воду, связанную на поверхности минералов, — физически связанную воду.

Вода, входящая в состав минералов. Академик В. И. Вернадский выделил следующие виды химически связанной воды, т. е. воды, входящей в состав минералов: а) конституционную; б) кристаллизационную; в) цеолитную.

Конституционная, или собственно химически связанная, вода прочно связана с веществом минерала. Она не сохраняет своей молекулярной целостности; молекулы ее в результате химических реакций распадаются на ионы H^+ и OH^- и в таком диссоциированном виде участвуют в строении кристаллических решеток минералов. При этом ион водорода в некоторых случаях может замещаться металлами (Ca, Mg, K, Na, Fe).

Конституционная вода входит в состав гидроксидов типа $Al_2(OH)_3$, $Ca(OH)_2$, она содержится в топазе $Al_2(OH)_2SiO_2$, малахите $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ и других минералах. Вода эта может быть выделена из минерала только при полном разрушении его кристаллической решетки при нагревании до очень высоких температур, достигающих нескольких сот градусов.

Кристаллизационная вода не образует с остальным веществом минерала химического соединения и участвует в построении кристаллических решеток минералов в виде нейтральной молекулы H_2O .

Типичными минералами, содержащими кристаллизационную воду, являются гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, мирабилит $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, эпсомит $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ и др.

Водород кристаллизационной воды не может замещаться ионами металлов.

Удаление кристаллизационной воды из минерала происходит при более низких температурах, нежели конституционной, но также при весьма высоких (значительно более $100^\circ C$). Удаление кристаллизационной воды из минералов сказывается на изменении их физических, оптических и других свойств. Меняются твердость, удельный вес, цвет, оптические константы — отражение и преломление, перестраивается кристаллическая решетка. Например, при удалении кристаллизационной воды из гипса (моноклинная система) он переходит в ангидрит (ромбическая система).

Цеолитная вода является частью кристаллизационной воды и характеризуется переменным содержанием в минерале и более низкой по сравнению с конституционной и кристаллизационной водой температурой выделения из минерала. Начинает выделяться из минералов при температуре $30-100^\circ C$. Содержание цеолитной воды в минерале может колебаться в значительных пределах, но при этом физическая однородность минерала (до известного предела) не нарушается, хотя физические свойства (удельный вес, прозрачность, окраска — показатель преломления) изменяются.

При нагревании цеолитная вода постепенно, без эндотермической остановки на кривой нагревания, выделяется из минерала и может снова при соответствующих условиях поглощаться обезвоженным минералом. Количество поглощаемой минералом воды при этом зависит от упругости паров, атмосферного давления и температуры.

Общая формула цеолитов — $(Na_2Ca)OAl_2O_3 \cdot nSiO_2mH_2O$, при этом m изменяется от 1 до 8.

Примерами минералов, содержащих цеолитную воду, являются томсонит, анальцит, монтмориллонит и др.

С инженерно-геологической точки зрения цеолитная вода имеет большое практическое значение. Из минерала она удаляется при температуре $105-110^\circ C$. Ее удаление при определении естественной влажности пород приводит иногда к ошибкам, в результате которых относительная влажность пород получается больше единицы, что физически невозможно наблюдать в природе. Кроме того,

завышение влажности пород приводит к снижению допустимых нагрузок на глинистые породы, при оценке их в качестве оснований фундаментов сооружений по действующим строительным нормативам.

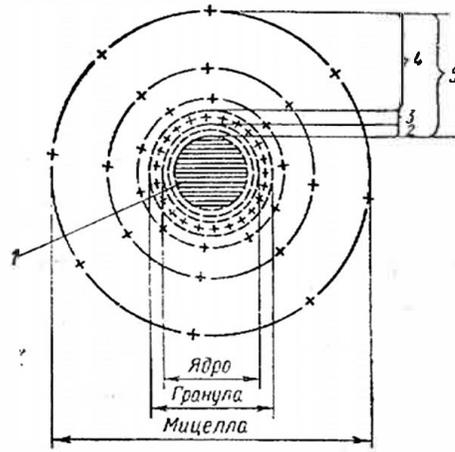


Рис. 16. Схема строения коллоидной мицеллы:

1 — глинистая коллоидная частица; 2 — отрицательные заряды на поверхности частицы; 3 — адсорбционный (неподвижный) слой катионов; 4 — диффузный (подвижный) слой; 5 — двойной электрический слой

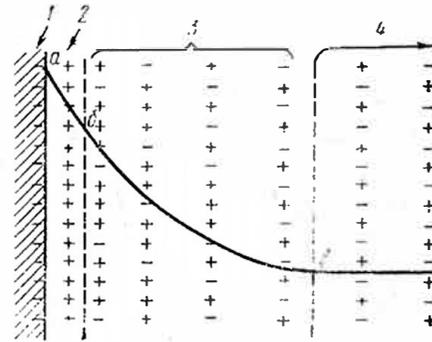


Рис. 17. Схема двойного электрического слоя:

1 — поверхность глинистой частицы с отрицательными зарядами; 2 — катионы адсорбционного слоя; 3 — катионы и анионы диффузного слоя; 4 — свободный раствор; ae — падение электрического потенциала в двойном электрическом слое; be — падение потенциала в диффузном слое (Z — потенциал)

Физически связанная вода. К физически связанной относится вода, связанная на поверхности минералов. Она содержится главным образом в тонкодисперсных глинистых породах и удерживается на поверхности минеральных частиц силами, имеющими электрическую природу.

Прочность связи воды с поверхностью минеральных частиц увеличивается по мере приближения слоя воды к поверхности частицы. По силе этой связи различают прочносвязанную и рыхлосвязанную воду. Прежде чем перейти к характеристике этих категорий воды, коротко остановимся на строении коллоидной частицы, которое позволит объяснить природу связей, возникающих между минеральными частицами пород и молекулами воды.

Коллоидная частица рассматривается в коллоидной химии как сложно построенная электрическая система. Большинство глинистых минералов, слагающих породы, имеют отрицательный заряд. Отрицательный заряд притягивает к поверхности минеральной частицы катионы водной среды. Катионы образуют вокруг частицы два слоя: адсорбционный и диффузный (рис. 16). Они удерживают-

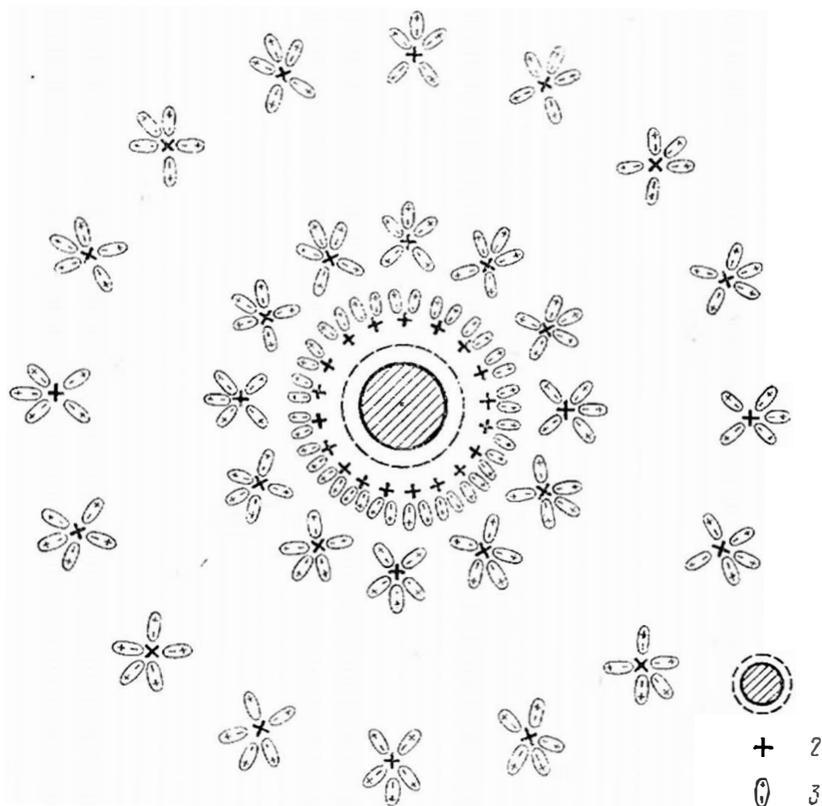
ся у поверхности частицы с различной силой. Катионы адсорбционного слоя, расположенные в непосредственной близости от частицы, связаны с ее поверхностью очень прочно и образуют с зарядом частицы неподвижную часть двойного электрического слоя. Чем дальше удалены катионы от поверхности частицы, тем меньше связь. Такое распределение ионов в водной среде вокруг коллоидных частичек происходит под влиянием двух сил: электрических и сил молекулярного теплового движения. Силы электрического притяжения между отрицательно заряженной частицей и положительно заряженными ионами концентрируют катионы вокруг частицы, а силы молекулярного теплового движения стремятся распределить ионы равномерно по всему раствору. В результате действия этих двух противоположных сил в растворе вокруг минеральной частицы устанавливается равновесие, аналогичное равновесию газов в земной атмосфере (уменьшение плотности газов по мере увеличения расстояния от Земли): концентрация катионов убывает по мере удаления от поверхности частицы, а концентрация анионов возрастает. На некотором расстоянии от твердой частицы обе концентрации выравниваются. Это расстояние определяет толщину диффузного слоя, за которым начинается свободный раствор. *Диффузным слоем* или *ионной атмосферой*, называется слой ионов, распределяющийся вокруг частицы по указанной закономерности. Толщина диффузного слоя может изменяться в зависимости от изменения физико-химической обстановки водной среды (см. гл. 10).

Коллоидная частица, окруженная адсорбционным и диффузным слоями ионов, называется *мицеллой*. Коллоидная частица, окруженная только ионами адсорбционного слоя, называется *гранулой*. Коллоидная частица, лишенная адсорбционного и диффузного слоев, называется *ядром*.

Электрические заряды частицы и катионы адсорбционного и диффузного слоев образуют двойной электрический слой вокруг коллоидной частицы, при этом заряды частицы и катионы адсорбционного слоя называются неподвижной частью двойного электрического слоя, а катионы диффузного слоя — подвижной частью (рис. 17).

Молекулы воды, попадая в электрическое поле, создаваемое зарядами частицы и ионов, находящихся в диффузном слое, принимают ориентированное положение: положительным полюсом они направлены в сторону отрицательно заряженных глинистых частиц, а отрицательным — к катионам адсорбционного слоя (рис. 18). Таким образом, создаются гидратные оболочки из молекул воды, связанных как непосредственно с ядром, так и с катионами адсорбционного и диффузного слоев. Из этих оболочек образуется общая гидратная оболочка вокруг глинистой частицы. Естественно, что чем больше полярность жидкости, тем больше ее молекул будет притягиваться глинистой частицей и катионами адсорбционного и диффузного слоев. Например, вода, обладающая очень высокой полярностью, образует более толстые гидратные оболочки, чем другие, менее полярные жидкости.

Толщина слоя воды, образующей гидратные оболочки, зависит от минералогического состава породы, размера и формы зерен, состава и концентрации водного раствора в порах породы, атмосферного давления, влажности и температуры воздуха.



Как уже было сказано, по силе связи гидратных оболочек с поверхностью минеральных частиц различают прочно- и рыхлосвязанную воду, отличающиеся по своим свойствам друг от друга и от обычной свободной воды и придающие породам различные свойства.

Прочносвязанная, или адсорбированная, вода отвечает гигроскопической воде по терминологии А. Ф. Лебедева. Образование слоя прочносвязанной воды сопровождается энергетическим эффектом с выделением значительного количества тепла (до 100 кал на 1 г воды), что указывает на прочную связь воды с поверхностью мине-

ральных частиц. Она связана с поверхностью минеральной частицы зарядами внутренней части двойного электрического слоя, т. е. зарядами ядра и катионов адсорбционного слоя. Адсорбированная вода трудноподвижна. Удерживается у поверхности частиц породы силами в тысячи атмосфер, поэтому искусственное удаление ее из породы может происходить только при очень высоких давлениях и весьма медленно.

Адсорбированная вода может поглощаться сухой породой из воды или непосредственно из воздуха, содержащего водяные пары. Количество прочносвязанной воды в этом случае находится в равновесии с упругостью водяного пара воздуха. Количество прочносвязанной воды увеличивается или уменьшается в зависимости от увеличения или уменьшения влажности воздуха.

Свойства прочносвязанной, или адсорбированной, воды резко отличны от свойств свободной — гравитационной воды. В частности, прочносвязанная вода перемещается в порах пород в парообразном состоянии от мест с большей упругостью в места с меньшей упругостью водяного пара. Она замерзает при температуре от 0 до -78°C . Обладает пониженной растворяющей способностью. Электропроводность ее значительно меньше, чем электропроводность свободной воды. Плотность адсорбированной воды изменяется от 1,2 до 2,4 г/см³. Она обладает большой вязкостью и упругостью. Оказывает заметное сопротивление сдвигу. Содержание прочносвязанной, как и рыхлосвязанной, воды в породах зависит от степени дисперсности породы, ее минералогического состава, содержания обменных ионов, влажности окружающей среды и степени нарушения естественного сложения.

Максимальное количество воды, поглощаемое данной породой с выделением тепла, т. е. максимальное количество прочносвязанной воды, называют *максимальной гигроскопичностью*, или *максимальной гигроскопической влагоемкостью*.

Гигроскопическую влажность пород, как и все другие виды влажности, определяют путем высушивания образцов изучаемой породы до постоянного веса при температуре $105-110^{\circ}\text{C}$ и рассчитывают отношение веса воды к весу сухой породы.

В природных условиях естественная влажность пород, как правило, выше их максимальной гигроскопической влагоемкости.

Максимальная гигроскопическая влагоемкость различных глин обычно изменяется в пределах 10—15%, супесей — в пределах нескольких процентов, а песков — десятых и сотых долей процента.

Глинистые породы с влажностью, равной максимальной гигроскопической влагоемкости, представляют собой непластичные твердые, более или менее прочные породы.

Непосредственно для оценки состояния пород гигроскопическая влажность обычно не определяется. При лабораторных исследованиях гигроскопическая влажность воздушно-сухих образцов определяется в качестве вспомогательной величины для расчетов (например, при гранулометрическом анализе).

Поверхность минералов в дисперсных породах обычно связывает значительно больше воды, чем максимальная гигроскопическая влагоемкость. Эту часть связанной воды называют *рыхлосвязанной водой* (вода поверхностных слоев по В. Д. Ломтадзе). Рыхлосвязанную воду В. И. Приклонский разделил на *собственно рыхлосвязанную* и *очень рыхлосвязанную воду*. Эти две категории воды, хотя и связаны между собой постепенными переходами, придают породам различные свойства. При содержании рыхлосвязанной воды глинистые породы находятся в твердом или полутвердом состоянии. Очень рыхлосвязанная вода уже способна сообщать породе пластические свойства. Она удерживается в породе силами в десятки и сотни атмосфер.

Рыхлосвязанная вода образует вокруг мицеллы гидратные оболочки, связанные с диффузным слоем и расположенные непосредственно за гидратными оболочками адсорбционного слоя. Толщина гидратных оболочек рыхлосвязанной воды не превышает 0,005—0,01 мкм.

Свойства рыхлосвязанной воды на поверхности минералов отличаются от свойств обычной воды. Она перемещается под действием сил молекулярного притяжения от частиц с толстой гидратной оболочкой (пленкой) к частицам с тонкой гидратной оболочкой независимо от влияния силы тяжести; может передвигаться под влиянием напора, создаваемого внешней нагрузкой. Это движение начинается при градиентах напора порядка 10 и более. Рыхлосвязанная вода может передвигаться также под влиянием осмотических и электроосмотических сил. В первом случае миграция воды происходит от мест с малой концентрацией ионов к местам с повышенной концентрацией ионов в растворе. Передвижение под влиянием электроосмотических сил возникает при наличии разности потенциалов постоянного электрического тока, при этом молекулы воды перемещаются к отрицательному электроду. Температура замерзания рыхлосвязанной воды ниже нуля. Плотность выше единицы.

При передаче на тонкодисперсную породу внешнего давления, стремящегося сжать породу, т. е. уменьшить поровое пространство между твердыми частицами, рыхлосвязанная вода оказывает расклинивающее давление на твердые частицы.

Рыхлосвязанная вода отвечает пленочной, а вместе с прочно связанной водой — молекулярной воде, по терминологии А. Ф. Лебедева. Максимальное количество этой воды, удерживаемое данной породой в данных условиях, А. Ф. Лебедев назвал *максимальной молекулярной влагоемкостью* (W_m). Величина максимальной молекулярной влагоемкости различных пород зависит от минералогического состава, степени дисперсности породы (т. е. от гранулометрического состава) и состава поглощенных катионов.

Максимальная молекулярная влагоемкость может быть определена тремя методами, разработанными А. Ф. Лебедевым: методом центрифугирования, методом влагоемких сред и методом высоких колонн.

Наиболее совершенным, точным является *метод центрифугиро-*

вания. Сильновлажный грунт помещают в центрифугу, которая при 50 000 оборотах в минуту развивает центробежную силу, равную 70 000 g. При такой центробежной силе избыток воды из образца удаляется и в породе остается только связанная вода, отвечающая величине максимальной молекулярной влажности.

Метод влагоемких сред основан на удалении из образца изучаемой породы воды, не удерживаемой силами молекулярного притяжения, с помощью гидрофобного материала. В качестве такого материала используется фильтровальная бумага. Изучаемая порода помещается несколькими слоями между фильтровальной бумагой и плотно обжимается по стандартизованным условиям. Влага, остающаяся в породе после отсасывания фильтровальной бумагой, характеризует величину максимальной молекулярной влагоемкости.

Метод высоких колонн применяется для определения максимальной молекулярной влагоемкости рыхлых — песчаных пород. Изучаемая порода загружается в стеклянную или металлическую трубку, в избыточном количестве насыщается водой, которой затем дают возможность свободно стекать из трубки с породой.

Определение максимальной молекулярной влагоемкости при инженерно-геологических исследованиях производится для расчета водоотдачи песков и для типизации пород как классификационный показатель.

Как уже было сказано выше, при влажности, отвечающей максимальной молекулярной влагоемкости, глинистые породы сохраняют еще твердое или полутвердое состояние; они непластичны, не поддаются формовке. Но в природе встречаются и глинистые породы, находящиеся в пластичном состоянии. Они не содержат свободной воды, но имеют влажность, значительно превышающую максимальную молекулярную влагоемкость. Вода, обуславливающая эту влажность, свободно не стекает. Очевидно, она также находится в связанном состоянии, но связана с частицами породы еще менее прочно, чем рыхлосвязанная вода. Эта вода названа В. А. Приклонским *очень рыхлосвязанной водой*. Она связана с периферическими частями диффузного слоя, образует самые внешние части гидратных оболочек и характерна только для тонкодисперсных — глинистых пород. В песках очень рыхлосвязанной воды нет.

Очень рыхлосвязанная вода оказывает влияние на пластичность глинистых пород только в образцах с нарушенной структурой. В породах, содержащих очень рыхлосвязанную воду, в естественных условиях пластичность не проявляется вследствие влияния структурных связей и текстурных особенностей. При нарушении структуры такие породы могут переходить в пластичное или даже текучее состояние без дополнительного искусственного увлажнения. Такое состояние глинистых пород называют *скрытопластичным* и *скрытотекучим*. Оно характерно для илистых глин современных аллювиальных и морских отложений. Механическая прочность таких пород очень невелика. При строительстве на таких породах обычно требуется закрепление пород основания или устройство искусственных оснований фундаментов.

Капиллярная вода. Вода, содержащаяся в капиллярных порах грунта и передвигающаяся под влиянием подъемной силы Q , которая является следствием поверхностного натяжения, развивающегося в вогнутом мениске воды на границе раздела вода — воздух (рис. 19), называется *капиллярной*.

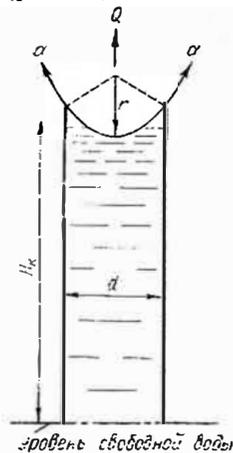


Рис. 19. Схема капиллярного мениска

Капиллярная вода не подчиняется закону силы тяжести и передвигается в капиллярных порах снизу вверх от уровня подземных вод. Высота капиллярного поднятия в общем виде определяется по формуле

$$H_k = 2 \frac{\alpha}{r \cdot \gamma_w},$$

где H_k — высота капиллярного поднятия; α — поверхностное натяжение воды: при t воды 15°C $\alpha = 0,0735 \text{ г/см}$; γ_w — удельный вес воды; r — радиус кривизны мениска, находящийся в прямой зависимости от диаметра капилляра.

Как видно из приведенной формулы, высота капиллярного поднятия обратно пропорциональна радиусу капиллярных пор. Однако эти представления о природе капиллярной воды не полностью отражают механизм движения воды в капиллярных порах. Они не учитывают взаимодействия молекул воды с минеральными частицами породы, наличия вокруг частиц породы также различных видов физически связанной воды.

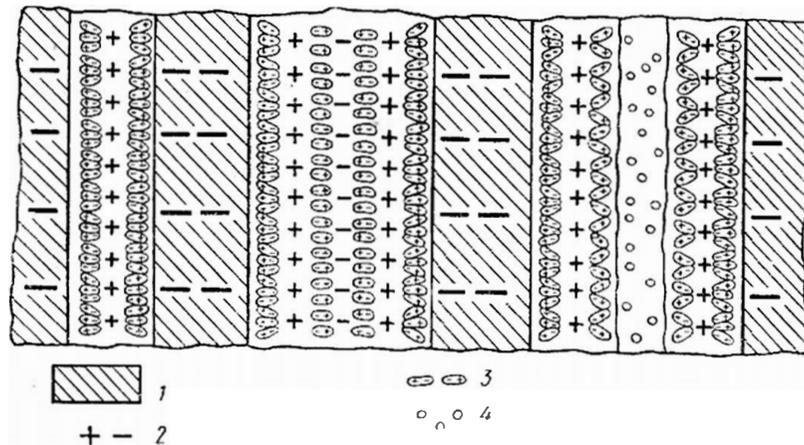


Рис. 20. Схема заполнения капиллярных и ультракапиллярных пор водой (по Н. А. Качинскому): 1 — стенки капилляров (частицы породы с отрицательными зарядами); 2 — ионы; 3 — молекулы связанной воды; 4 — свободная вода

Специальные исследования этого вопроса Н. А. Качинским показали, что передвижение капиллярной воды происходит только в капиллярных порах диаметром больше $0,1 \text{ мкм}$. В ультракапиллярных порах ($d < 0,1 \text{ мкм}$) капиллярного движения воды не наблюдается, так как все пространство этих пор полностью занято связанной водой (рис. 20). В грубодисперсных породах с размером зерен больше 2 мм капиллярной воды также не наблюдается, и все поры таких пород содержат свободную — гравитационную воду.

Таким образом, до известных пределов высота капиллярного поднятия воды зависит от размера минеральных частиц и увеличивается при уменьшении их диаметра. В глинистых грунтах она зависит также от структуры и текстуры.

Различают капиллярно-поднятую и капиллярно-подвешенную воду (рис. 21).

Капиллярно-поднятая вода расположена непосредственно выше уровня подземных вод и зависит от положения этого уровня. При снижении уровня подземных вод снижается верхняя граница зоны капиллярной воды и наоборот.

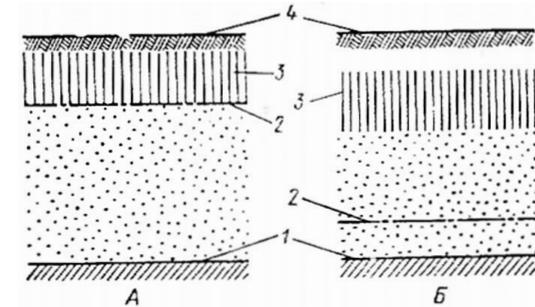


Рис. 21. Схема капиллярно-поднятой (А) и капиллярно-подвешенной (Б) воды:

1 — водоупорная порода; 2 — уровень грунтовых вод; 3 — капиллярная вода; 4 — поверхность Земли

При испарении капиллярной воды уровень ее не изменяется. Он поддерживается поступлением свободной воды от уровня подземных вод по капиллярным порам.

Капиллярно-подвешенная вода в отличие от капиллярно-поднятой не имеет непосредственной связи с уровнем грунтовых вод, поэтому она не может питаться за счет подземных вод. В природных условиях капиллярно-подвешенная вода образуется при просачивании атмосферных осадков в зону аэрации, сложенную тонко- и мелкозернистыми породами, подстилаемыми крупнозернистыми породами, и при глубоком залегании уровня грунтовых вод.

При испарении капиллярно-подвешенной воды уровень ее постепенно снижается. При продолжительном испарении капиллярно-подвешенная вода может исчезнуть полностью.

Свойства воды в капиллярной зоне отличны от свойств связанной и свободной воды. Они являются как бы переходными между теми и другими. В своем движении капиллярная вода не подчиняется закону силы тяжести. Она не вытекает свободно в горные выработки. В то же время силы связи ее с поверхностью минеральных частиц значительно меньше, нежели связанной воды. Капиллярная

вода в отличие от последней передает гидростатическое давление. Замерзает она при температуре ниже 0° . Температура ее замерзания тем ниже, чем меньше диаметр капиллярных пор, в которых она находится. Так, в капиллярных порах диаметром 1,6 мм она замерзает при температуре $-6,4^{\circ}$ С, а в капиллярных порах диаметром 0,06 мм — при температуре около -19° С.

Инженерно-геологическое значение капиллярной воды заключается в том, что она вызывает в ряде случаев специфические процессы, неблагоприятно сказывающиеся на хозяйственной деятельности человека.

В районах орошаемого земледелия повышение уровня подземных вод в результате полива вызывает соответствующее повышение уровня капиллярной зоны, нередко она достигает поверхности Земли. В таком случае при интенсивном испарении капиллярной воды в условиях жаркого климата на поверхности почв происходит отложение солей, содержащихся в подземных водах. Капилляры работают как насосы, поднимающие все время новые порции подземной воды до поверхности Земли. Эти процессы при неправильном ведении поливного хозяйства приводят к сильному засолению почв; они полностью теряют плодородие, выходят из сельскохозяйственного оборота и требуют проведения мелиоративных мероприятий по рассолению.

При строительстве дорог капиллярная вода увлажняет полотно дороги и нередко вызывает при замерзании образование пучин, разрушающих дорожное полотно.

Заложение фундаментов зданий в зоне капиллярного поднятия сопряжено с появлением сырости в подземных или цокольных помещениях, а при подземных водах, характеризующихся агрессивностью, — с постепенным разрушением фундаментов.

Все эти неблагоприятные процессы требуют проведения специальных мероприятий (дренаж, искусственное снижение высоты капиллярного поднятия, гидроизоляция и др.) по борьбе с ними. Для проектирования мероприятий надо знать капиллярные свойства грунтов: максимальную высоту и скорость капиллярного поднятия. Эти показатели определяются в лабораторных условиях путем непосредственного наблюдения за поднятием капиллярной воды в стеклянных трубках, заполненных изучаемой породой, либо в специальных приборах — капилляриметрах.

Высота капиллярного поднятия может быть определена также путем непосредственных наблюдений за увлажнением породы выше уровня грунтовых вод в шурфах, канавах, расчистках и других выработках.

Количество воды, содержащееся в капиллярной зоне при полном заполнении капиллярных пор водой, называют *капиллярной влагоемкостью породы* (W_k). Определяется она путем изучения влажности образца, взятого в капиллярной зоне. При инженерно-геологических исследованиях определяется довольно редко.

Свободная вода. Свободной, или гравитационной, водой называют воду, заполняющую различные крупные пустоты в горных

породах и передвигающуюся в них под влиянием силы тяжести и разности напоров.

Свободная вода, передвигающаяся в породах сверху вниз под влиянием силы тяжести, называется *просачивающейся водой* (атмосферная влага), а движущаяся в разных направлениях под влиянием разности напоров — *потоками подземных вод*. В некоторых случаях при этажном расположении водоносных горизонтов, разделенных между собой глинистыми породами, может наблюдаться перетекание подземных вод из нижележащих водоносных горизонтов в вышележащие через толщи глин под влиянием большой разности напоров в этих горизонтах.

Иногда свободная вода может быть заключена в замкнутых пустотах породы и находиться в состоянии покоя — *иммобилизованная вода*.

Свободная вода обладает обычными признаками, свойственными воде на поверхности Земли. Ее количество в горных породах зависит от характера пород, их структуры и гранулометрического состава, степени трещиноватости скальных пород и от других факторов. В плотных глинистых породах, где количество макропор весьма незначительно, свободная вода содержится в незначительных количествах и может отсутствовать совсем. Эти породы содержат преимущественно связанную воду. В крупнообломочных и трещиноватых скальных породах свободная вода преобладает над другими видами воды.

По химическому составу свободная вода может быть различной. Она содержит растворенные соли и газы, а также различные вещества в коллоидальном состоянии. Количество растворенных веществ может колебаться от нескольких десятков и сотен миллиграммов на литр воды (пресные, слабоминерализованные воды) до граммов, десятков и сотен граммов на литр воды (солончатые, соленые воды и рассолы).

Растворенные в воде соли находятся в подвижном равновесии с минеральной частью породы. Из катионов в воде чаще всего встречаются Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} и K^{+} , а из анионов — Cl^{-} , SO_4^{2-} и HCO_3^{-} . Из коллоидов наиболее часто в воде находятся SiO_2 и полутонные окислы. Значение pH колеблется от 6 до 9—10. Из газов в воде наиболее часто встречаются кислород, углекислота, азот, сероводород.

При температуре ниже 0° свободная вода замерзает с образованием в порах породы кристаллов льда. Кристаллы льда в большинстве случаев играют роль цемента, повышающего прочность породы. При оттаивании такой породы прочность ее уменьшается.

Инженерно-геологическое значение свободной воды заключается в том, что она является универсальным растворителем. Растворяющая — агрессивная способность воды приводит к ослаблению монолитности — прочности пород. Вода, замерзающая в трещинах скальных пород, вызывает механическое разрушение этих пород (морозное выветривание).

Свободная вода, находящаяся в породах, передает гидростатическое давление, уменьшает вес скелета породы по закону Архимеда, оказывает взвешивающее давление на подошву сооружений; это должно учитываться при проектировании оснований сооружений.

Механическое действие движущейся воды заключается в гидродинамическом давлении, оказываемом на породы в откосах и различных выработках, в выносе частиц породы — суффозии, образовании плывунов, оползней и других процессов, подробно изучаемых в последующих курсах инженерной геологии.

Контрольные вопросы

1. Инженерно-геологическое значение наличия газов в порах породы.
2. Какие категории воды важно различать в горных породах?
3. Какие категории воды относятся к химически связанной воде и как они различаются между собой?
4. Физически связанная вода и природа сил, удерживающих эту воду на поверхности частиц.
5. Каковы свойства и особенности прочносвязанной воды?
6. Инженерно-геологическое значение рыхло- и очень рыхлосвязанной воды.
7. Инженерно-геологическое значение капиллярной воды.
8. Инженерно-геологическое значение свободной воды.

Литература

- Приклонский В. А. Грунтоведение. М., Гос. изд-во лит. по геологии и охране недр, 1953, гл. 11, 12.
Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. III, § 1 и 2.

Основными физическими свойствами горных пород являются влажность, удельный и объемный вес и пористость. Они имеют большое практическое значение при оценке пород как естественных оснований различных сооружений, оценке устойчивости земляных масс, при расчете земляных дамб и т. д. При этом следует иметь в виду, что влажность характеризует свойства пород без жестких связей и некоторых разновидностей пород с жесткими связями (полускальные породы).

Всякая горная порода состоит из твердых минеральных частиц и расположенных между ними пустот — пор, которые могут быть заполнены воздухом (газами) или водой (нефтью). Таким образом, твердые минеральные частицы, вода и воздух являются основными компонентами, составляющими породу. Их в грунтоведении называют *фазами грунта*. В общем случае всякая горная порода — грунт представляет собой *трехфазную систему* — твердые частицы + воздух + вода. Двухфазная система — твердые частицы + вода (порода, поры которой полностью заполнены водой) или твердые частицы + воздух (абсолютно сухая порода) — в естественных условиях почти не встречается, так как в любых условиях каждая порода содержит некоторое количество воздуха и воды.

Соотношение между объемами твердых частиц, водой и воздухом может меняться под влиянием естественных и искусственных причин. Оно практически не оказывает влияния на свойства пород с жесткими связями (скальные) и в большой степени влияет на свойства рыхлых пород. Особенно велико это влияние на глинистые породы.

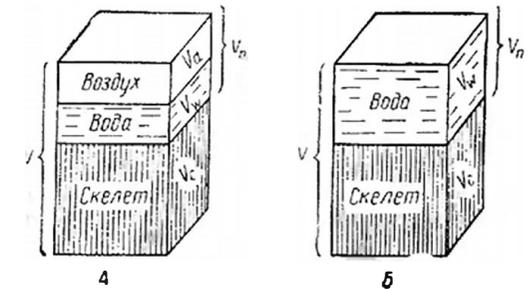


Рис. 22. Схема составных частей трехфазной (А) и двухфазной (Б) породы:

V — объем всей породы; V_c — объем скелета; V_n — объем пор; V_n — объем воздуха в порах; V_w — объем воды в порах

Если мы знаем объем всей породы (V), объем твердых частиц (V_c), объем пор (промежутков между частицами V_n), объем воды в порах (V_w), объем воздуха в порах (V_a), вес всей породы (g), вес твердых частиц (g_c) и вес воды в порах (g_w), мы можем определить показатели физического состояния и физических свойств породы (рис. 22).

Влажность породы

Под *влажностью породы* (W) понимают содержание в ее порах того или иного количества воды, удаляемой при нагревании породы до температуры не свыше 105°C . Эта вода находится в порах породы и на ее поверхности в отличие от химически связанной воды, участвующей в построении кристаллической решетки.

Все количество воды, которое содержит порода в естественных условиях залегания, называют *естественной влажностью породы*.

Естественная влажность песчаных и глинистых пород является очень важной характеристикой физического состояния этих пород. Она определяет их прочность и поведение под воздействием сооружения. Влажность — величина переменная. Если ниже уровня грунтовых вод (в зоне насыщения) она почти не изменяется, то выше уровня грунтовых вод (в зоне аэрации и особенно в верхней ее части — почвенном слое) естественная влажность изменяется во времени. Наблюдаются суточные, сезонные и годовые колебания естественной влажности. Они связаны с температурой и давлением воздуха, количеством выпадающих атмосферных осадков и положением уровня грунтовых вод. Кроме естественных факторов на влажность пород и почв зоны аэрации могут оказывать влияние искусственные факторы — орошение земель, характер сельскохозяйственных культур, подпор грунтовых вод, различные строительные мероприятия и другая хозяйственная деятельность человека (утечка из водопроводов, сброс хозяйственных и промышленных сточных вод и др.).

Влияние естественной влажности на прочность пород различно в зависимости от типа пород. В песчаных породах влажность оказывает влияние на прочность и устойчивость мелкозернистых и глинистых их разновидностей. На оценку прочности средне- и крупнозернистых песков и крупнообломочных пород влажность не оказывает существенного влияния.

В глинистых породах наблюдается резкое изменение свойств в зависимости от степени влажности. Сухие глинистые породы ведут себя как твердые тела. С увеличением влажности они постепенно теряют свою первоначальную прочность, переходят в мягкое состояние, а при сильном переувлажнении отдельные их разновидности могут течь как жидкое тело, т. е. полностью теряют прочность.

Особенно сильно снижает прочность глинистых пород попеременное высыхание и увлажнение. В этих случаях они быстро выветриваются, растрескиваются, в обнажениях их поверхность покрывается рыхлым, щебеночным материалом, при обильном увлажнении легко переходящим в подвижное состояние.

Влажность пород выражают отношением веса воды, содержащейся в порах породы, к весу сухой породы (весовая влажность) в процентах:

$$W = \frac{g_w}{g_c} 100\%.$$

Влажность отдельных образцов определяют путем высушивания их при температуре $100\text{—}105^\circ\text{C}$ до постоянного веса. Зная вес породы до высушивания и вес сухого грунта после высушивания, можно легко определить вес воды и влажность породы:

$$W = \frac{g - g_c}{g_c} = \frac{g_w}{g_c} : 100\%.$$

Определение влажности в лабораторных условиях производится по Государственному стандарту (ГОСТ 5179—64). В полевых условиях влажность пород по разрезу определяют геофизическими методами (нейтронный каротаж).

Удельный вес

Удельным весом (γ) *породы* называют вес единицы объема твердых частиц (скелета) породы. Численно он равен отношению веса твердой части породы (g_c) к ее объему (V_c) и выражается в г/см^3 , характеризует только твердую фазу породы и не зависит от соотношения твердой, жидкой и газообразной фаз. Для данной породы эта величина постоянная.

Удельный вес зависит только от минералогического состава породы и возрастает с увеличением содержания в породе тяжелых минералов.

Удельный вес пород, состоящих из одних и тех же минеральных частиц, независимо от пористости и влажности будет один и тот же. Так, например, удельные веса кварца, чистого кварцевого песка, кварцевого песчаника с кварцевым цементом и сливного кварцита равны $2,65 \text{ г/см}^3$.

Удельный вес большинства породообразующих минералов и пород колеблется в небольших пределах (табл. 17 и 18). Величина удельного веса входит во многие расчетные формулы для определения косвенных и прямых расчетных показателей: пористости, объемного веса, коэффициента влажности и др. Для приблизительных расчетов значения удельного веса берут из справочных таблиц.

Удельный вес определяется с помощью пикнометра по методу, установленному ГОСТ 5181—64. С помощью пикнометра и аналитических весов определяют объем и вес твердой фазы. Для определения удельного веса незасоленных грунтов применяют дистиллированную воду, а для засоленных грунтов — нейтральную жидкость — керосин, предварительно обезвоженный (чтобы не происходило растворение солей, содержащихся в породе). Для удаления из породы воздуха ее кипятят в дистиллированной воде или вакуумируют в керосине.

Таблица 17

Удельные веса некоторых породообразующих минералов
(по В. А. Приклонскому)

Наименование минералов	Удельный вес, г/см ³	Наименование минералов	Удельный вес, г/см ³
Альбит	2,60—2,62	Каолинит	2,63
Анортит	2,74—2,76	Монтмориллонит	2,0—2,2
Биотит	2,7—3,1	Лимонит	3,6—4,0
Галит	2,2—2,6	Магнетит	5,17—5,18
Гипс	2,31—2,33	Мусковит	2,76—3,00
Глауконит	2,2—2,8	Ортоклаз	2,56—2,58
Доломит	2,8—2,9	Пирит	4,95—5,10
Кальцит	2,71—2,72	Роговые обманки	3,0—3,3

Таблица 18

Удельные веса некоторых пород

Наименование породы	Удельный вес, г/см ³
Торф (20—30% разложение)	0,5—0,7
Песок ледниково-речной (г. Мытищи)	2,66
Лёсс (г. Запорожье)	2,68
Мелетовая (майкопская) глина района канала Волго-Дон	2,73
Верхнекаменноугольная глина (г. Москва)	2,78
Верхнеюрская глина (г. Москва)	2,92
Аргиллит	2,63—2,86
Песчаник	2,62—2,74
Известняк	2,40—2,71
Доломит	2,74—2,82
Вулканический туф	2,71—2,84
Базальт	2,82—2,95
Порфирайт	2,70—2,99
Гранит	2,67—2,72
Пироксенит	3,15—3,32

Естественный объемный вес

Естественным объемным весом (Δ), или просто *объемным весом*, принято считать вес единицы объема породы естественной влажности и сложения. Он выражается в г/см³ или т/м³:

$$\Delta = \frac{g}{V} \text{ г/см}^3$$

По численному значению естественный объемный вес породы характеризует относительную плотность сложения породы в естественных условиях залегания. Чем больше объемный вес породы, тем более плотное сложение она имеет.

Объемный вес породы — величина переменная. Кроме минералогического состава она зависит от влажности породы и ее пористости (плотности). Чем больше влажность грунта, тем больше его объем-

ный вес. Максимального значения при данной пористости объемный вес породы достигает при полном заполнении пор водой (табл. 19).

Таблица 19

Объемный вес породы (Δ) в зависимости от удельного веса, пористости и влажности

Удельный вес г/см ³	Пористость, %	Объемный вес при различной степени влажности, г/см ³	
		вода заполняет 50% пар	вода заполняет все поры
2,50	60	1,30	1,60
2,50	25	2,00	2,12
2,60	60	1,34	1,64
2,60	25	2,07	2,20
2,70	60	1,38	1,68
2,70	25	2,15	2,27
2,80	60	1,42	1,72
2,80	25	2,22	2,35

Величина объемного веса пород без жестких связей (рыхлых и связных глинистых) колеблется в больших пределах: от 1,30 до 2,4 г/см³. Объемные веса пород с жесткими кристаллическими связями (скальные породы), за исключением некоторых разностей (полускальные породы), вследствие малой пористости их и влажности близки по значению к удельному весу этих пород.

Объемный вес пород служит прямым расчетным показателем при расчетах давления породы на подпорные стенки, при расчетах устойчивости откосов, распределения напряжений в породах основания фундаментов и в других случаях, о которых было сказано в гл. 2.

Для песков кроме естественного объемного веса, который практически не всегда удается получить вследствие отсутствия универсальных приборов, позволяющих отбирать образцы песков с ненарушенной структурой, определяют два объемных веса при одинаковом значении влажности: 1) при максимальном искусственном разрыхлении — минимальное значение объемного веса при данной его влажности (Δ_{\min}) и 2) при максимальном искусственном уплотнении — максимальное значение объемного веса при той же влажности (Δ_{\max}). Эти два значения объемного веса характеризуют способность песка к уплотнению. Чем больше разница между обоими значениями объемного веса, тем выше способность песка к уплотнению.

Объемный вес влажной породы определяют в лаборатории по ГОСТ 5182—64 двумя способами: способом режущего кольца и способом парафинирования. Первый способ применяют для пород, легко поддающихся резке ножом, не крошащихся, а также в тех случаях, когда объем и форма образца могут быть сохранены только при помощи жесткой тары, например для песчаных пород ненарушенного сложения и с естественной влажностью. Второй способ

рекомендован ГОСТом для связных пород и особенно пород, не поддающихся взятию в кольцо (склонных к выкрошиванию). По первому способу определяют вес и влажность породы, взятой в кольцо известного объема, а затем по всем этим значениям рассчитывают величину объемного веса. По второму способу образец изучаемой породы покрывают гидронизолирующей пленкой (парафином) и по разности его веса в воде и в воздушной среде определяют объем, а затем по формуле рассчитывают объемный вес породы.

В полевых условиях объемный вес может быть определен геофизическими методами изучения рассеивания гамма-излучения гамма-плотномерами и поглощения гамма-излучения вилкой и щупом конструкции В. И. Ферронского и Л. В. Селиванова.

Объемный вес скелета породы (объемный вес сухой породы)

Объемным весом скелета породы (δ) принято называть вес единицы объема абсолютно сухой породы, т. е. вес единицы объема породы естественной пористости за вычетом воды:

$$\delta = \frac{g - g_w}{V} = \frac{g_c}{V} \text{ г/см}^3.$$

Объемный вес скелета зависит от минералогического состава и пористости породы. Чем меньше пористость и выше содержание тяжелых минералов в породе, тем больше объемный вес ее скелета.

Объемный вес данной сухой породы всегда меньше ее удельного веса и объемного веса той же породы во влажном состоянии.

Величина объемного веса скелета используется для вычисления пористости породы. Так как объемный вес скелета изменяется с изменением структуры, т. е. расположения зерен, то для правильной характеристики пористости объемный вес скелета породы должен обязательно определяться на образцах с ненарушенной структурой. Так как при высушивании глинистых пород происходит усадка, уменьшение объема, т. е. изменение пористости, то объемный вес сухих глинистых пород непосредственно не определяется, а рассчитывается по объемному весу влажной породы и ее влажности. Возьмем равенства

$$\delta = \frac{g_c}{V} \text{ и } \Delta = \frac{g}{V}.$$

Из равенств вытекает, что

$$V = \frac{g_c}{\delta} \text{ и } V = \frac{g}{\Delta},$$

следовательно, $\frac{g_c}{\delta} = \frac{g}{\Delta}.$

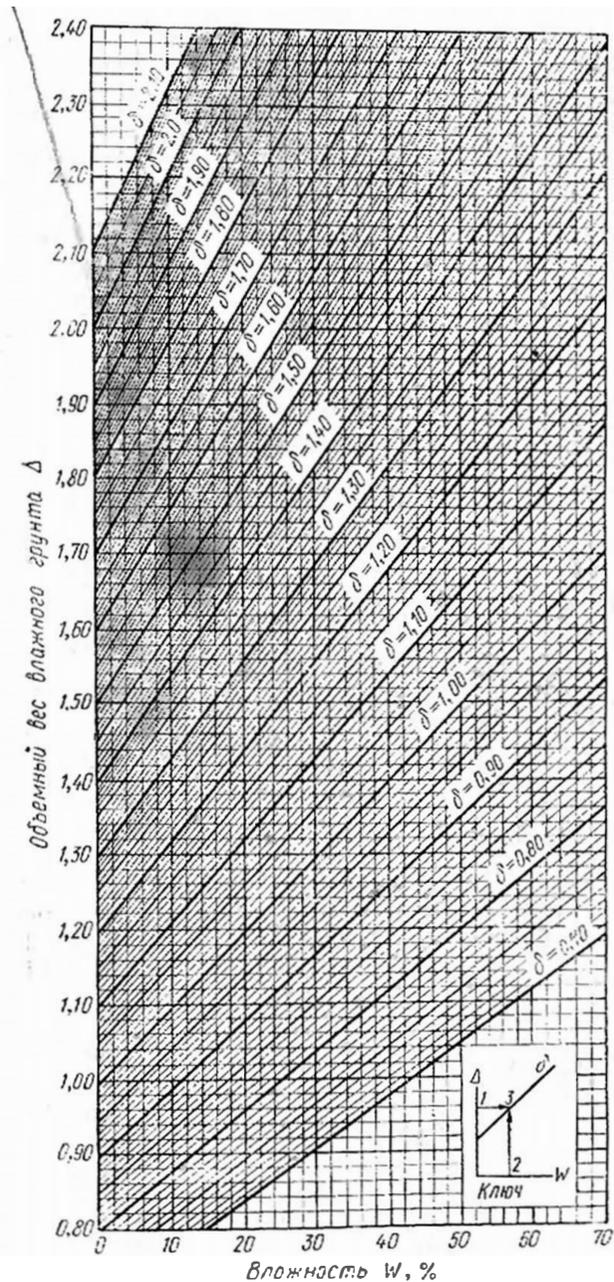


Рис. 23. Номограмма Приклонского для вычисления объемного веса сухой породы

Если принять $g_c = 1$, тогда

$$\frac{1}{\delta} = \frac{g}{\Delta},$$

но $g = g_c + g_w$, при $g_c = 1$, $g = 1 + g_w$, $W = \frac{g_w}{g_c}$,

откуда при $g_c = 1$ $W = g_w$ и, следовательно, $g = 1 + W$.

Подставляя это значение в выражение $\frac{1}{\delta} = \frac{g}{\Delta}$, получим расчетную формулу

$$\delta = \frac{\Delta}{1 + 0,01W} \text{ г/см}^3.$$

Объемный вес сухой породы может быть определен также по номограмме (рис. 23).

Объемный вес породы под водой

Объемный вес породы под водой (δ_u) представляет собой вес единицы объема породы ниже уровня грунтовой воды. По закону Архимеда, вес породы, погруженной в воду, уменьшается на величину веса вытесненной твердыми частицами воды, т. е. объемный вес породы под водой будет меньше, чем на воздухе. Очевидно, что теряют в весе твердые частицы:

$$\delta_u = \delta - V_c,$$

т. е. объемный вес под водой равен объемному весу скелета, уменьшенному на вес вытесненной воды в объеме скелета.

Примем, что общий объем породы равен 1:

$$V = V_n + V_c = 1; \delta = \frac{g_c}{V},$$

$$\text{т. е. } \delta = \frac{g_c}{V_c + V_n},$$

но $V_c + V_n = V = 1$, тогда $\delta = g_c$.

Подставляя это выражение в формулу

$$\gamma = \frac{g_c}{V_c},$$

$$\text{получим } \gamma = \frac{\delta}{V_c},$$

$$\text{откуда } V_c = \frac{\delta}{\gamma}.$$

Подставляя это значение в выражение $\delta_u = \delta - V_c$, получаем

$$\delta_u = \delta - \frac{\delta}{\gamma} = \frac{\delta(\gamma - 1)}{\gamma} \text{ г/см}^3.$$

Величина объемного веса породы под водой используется при расчете устойчивости основания и откосов вместо величины Δ для пород ниже уровня грунтовых вод, при оценке явления суффозии и др.

Пористость

Горные породы состоят из твердых минеральных частиц и пустот между ними. Размер пустот может быть различным, начиная от громадных карстовых пещер до пустот, неразличимых под микроскопом. Наличие в породах пустот Ф. П. Саваренский назвал *скважностью*. Скважность горных пород представляет большой практический интерес, так как пустоты являются путями движения в породах воды, нефти и газов; они оказывают непосредственное влияние на свойства пород и прежде всего на их прочность.

Пустоты в породах, по Ф. П. Саваренскому, разделяют на некапиллярные (или скважность), в которых вода передвигается под влиянием силы тяжести (крупные поры, трещины, карстовые пустоты) и капиллярные (или пористость).

К собственно порам обычно относят пустоты округлой формы. Л. В. Пустовалов предлагает разделять их на три группы: 1) *сверхкапиллярные* размером более 0,5 мм, в которых вода продвигается под влиянием тяжести; 2) *капиллярные* размером от 0,5 до 0,002 мм, в которых вода передвигается под влиянием капиллярных сил; 3) *субкапиллярные* размером менее 0,002 мм, в которых вся вода связана с поверхностью частиц молекулярными и электростатическими силами.

В сверхкапиллярных порах выделяют также *макропоры*. Их размер 1—2 мм и более. Они видимы невооруженным глазом.

Поры в породах могут быть связаны между собой и с атмосферой или изолированы друг от друга и от атмосферы. В первом случае говорят об *открытой*, а во втором — о *закрытой пористости*.

По происхождению пор обычно выделяют: а) первичную пористость, образовавшуюся в процессе накопления осадка и только изменившуюся в процессе диагенеза; б) вторичную, образовавшуюся в уже сформировавшейся породе в результате выщелачивания, выветривания, тектонических процессов, жизнедеятельности растений и животных организмов.

Показатели пористости, используемые в грунтоведении, характеризуют лишь общий объем пор, но не дают представления о размере и форме пор и характере их распределения в породе.

Используются два показателя: пористость и коэффициент пористости (приведенная пористость).

Показателем общей пористости (n) является отношение объема пор к объему всей породы, выраженное в процентах:

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

Коэффициент пористости (ϵ) представляет собой отношение объема пор к объему скелета породы, выраженное в долях единицы:

$$\epsilon = \frac{V_n}{V_c}$$

В нефтяной геологии и гидрогеологии выделяют еще так называемую *эффективную пористость*, под которой понимают ту часть пор, по которым возможно передвижение жидкости (воды или нефти) и газа. В инженерной геологии этот показатель пористости почти не используется.

Пористость и коэффициент пористости непосредственно не определяются, а рассчитываются по формулам:

$$n = \frac{V_n}{V} = \frac{V - V_c}{V} = 1 - \frac{V_c}{V}$$

Разделим числитель и знаменатель дроби на вес скелета грунта

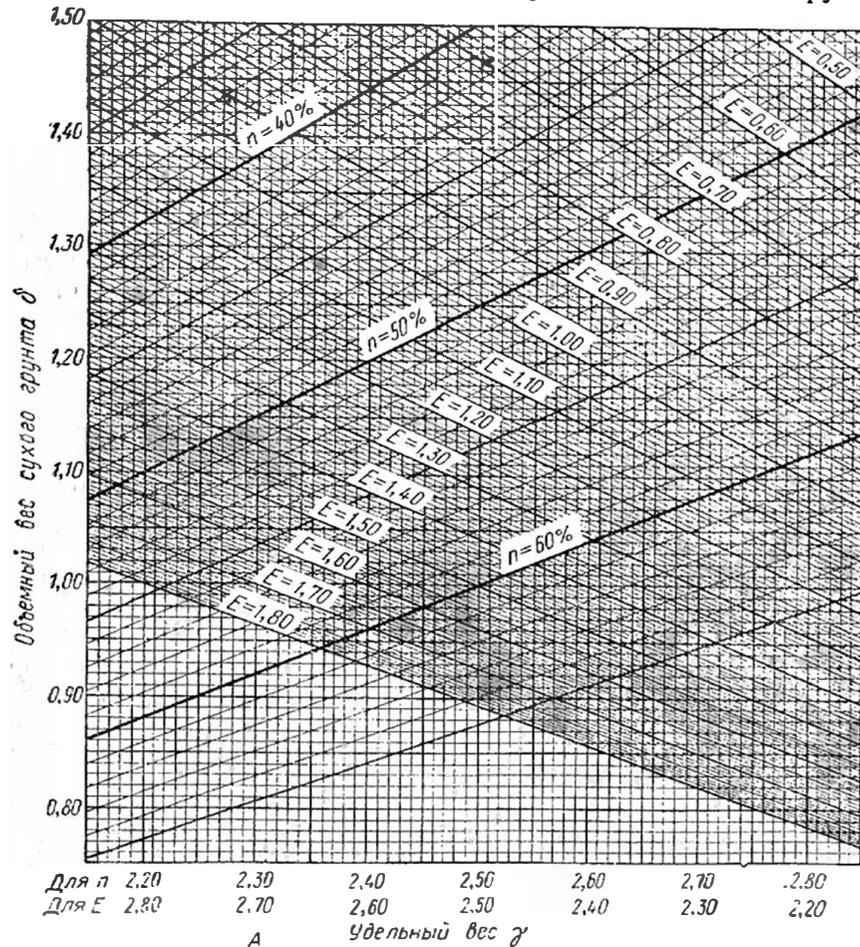


Рис. 24. Номограмма Приклонского для вычисления

g_c , получим

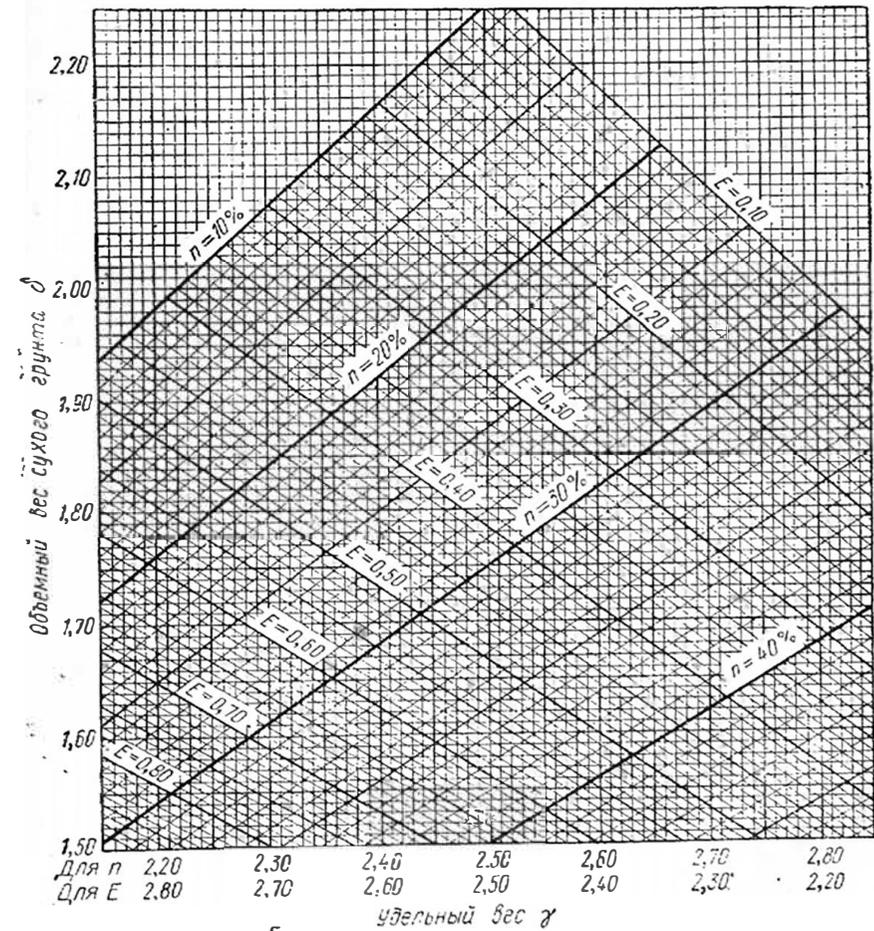
$$n = 1 - \frac{\frac{V_c}{V}}{\frac{g_c}{g_c}}$$

но

$$\frac{V_c}{g_c} = \frac{1}{\gamma}, \text{ а } \frac{V}{g_c} = \frac{1}{\delta},$$

откуда

$$n = 1 - \frac{1}{\frac{\gamma}{\delta}} \text{ и } n = \frac{\gamma - \delta}{\delta} \cdot 100\%$$



пористости и коэффициента пористости

Заменив в этом выражении

$$\delta = \frac{\Delta}{1 + 0,01W},$$

получим формулу для расчета пористости по объемному весу влажной породы, ее влажности и удельному весу:

$$n = \left[1 - \frac{\Delta}{\gamma(1 + 0,01W)} \right] \cdot 100\%.$$

С помощью таких же простейших преобразований, которые были сделаны для n , можно получить формулы для определения ϵ :

$$\epsilon = \frac{\gamma - \delta}{\delta},$$

$$\epsilon = \frac{\gamma(1 + 0,01W) - \Delta}{\Delta} - 1.$$

Пористость и коэффициент пористости могут быть также определены по номограммам В. А. Приклонского (рис. 24, А, Б).

Пористость и коэффициент пористости взаимосвязаны между собой следующими соотношениями:

$$n = \frac{V_n}{V}, \quad \frac{1}{n} = \frac{V}{V_n} = \frac{V_n + V_c}{V_n} = 1 + \frac{V_c}{V_n} = 1 + \frac{1}{\epsilon},$$

откуда

$$n = \frac{\epsilon}{1 + \epsilon} \cdot 100\% \quad \text{и} \quad \epsilon = \frac{n}{100 - n}.$$

Зная указанные выше соотношения, нетрудно получить формулы для определения объема пор и объема скелета в 1 см^3 данной породы. Первый будет равен

$$V_n = \frac{\epsilon}{1 + \epsilon},$$

а второй

$$V_c = \frac{1}{1 + \epsilon}.$$

Численные соотношения между значениями n и ϵ приведены в табл. 20.

Таблица 20

Соотношения между пористостью и коэффициентом пористости

$n, \%$	ϵ	$n, \%$	ϵ
10	0,11	50	1,00
20	0,25	60	1,50
33	0,50	75	3,00
40	0,67	80	4,00

Пористость у различных горных пород различна. У магматических, метаморфических и сцементированных осадочных пород она обычно невелика и измеряется десятыми долями и максимално несколькими процентами. Исключением являются некоторые лавы и вулканические туфы, пористость которых достигает десятков процентов. Например, у артинской туфовой лавы (артинский туф), разрабатываемой в Армении, пористость достигает 55—60%. Это туф малинового цвета; он является прекрасным термоизоляционным материалом и широко используется в строительстве вместо кирпича и для облицовки. Среди осадочных пород высокой пористостью отличаются некоторые песчаники (35—40%) и органогенные известняки — ракушечники (до 40—45%).

В глинистых породах пористость зависит от размеров частиц и структуры. У некоторых глин и суглинков пористость достигает 60% и более.

В рыхлых породах пористость зависит главным образом от размеров частиц и их формы. В крупнообломочных породах большую роль играет степень сортированности частиц. В хорошо отсортированных однородных породах пористость может достигать 30 и более процентов, а в слабоотсортированных незначительна — 20% и менее.

В песках пористость также изменяется в широких пределах.

Если бы все зерна обломочных пород были одинаковой величины и шарообразной формы, то было бы нетрудно подсчитать, что при разном сложении пористость в одном случае (рис. 25, А) будет минимальной — 25,95%, а в другом (рис. 25, Б) — максимальной — 47,64%.

Фактически же вследствие большей или меньшей неоднородности рыхлых пород, различных размеров частиц и их неправильной формы пористость пород колеблется в пределах 20—45%.

Показатели пористости являются косвенными расчетными показателями. С их помощью вычисляются объемный вес породы, коэффициент фильтрации и водоотдачи песков, параметры компрессионной кривой, плотность сложения и другие прямые расчетные показатели.

По СНиП II-Б.1—62, плотность сложения песков определяется в зависимости от величины коэффициента пористости (табл. 21).

Разделение песков по плотности выполняется на основе определения коэффициента пористости на образцах с ненарушенной структурой и служит основой для установления нормативного давления на песчаные породы при проектировании на них фундаментов сооружений.

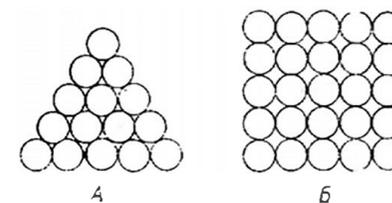


Рис. 25. Зависимость пористости от расположения частиц:
А — плотное сложение — минимальная пористость; Б — рыхлое сложение — максимальная пористость

Классификация песков по плотности (по СНиП II-Б.1—62)

Наименование видов песчаных пород	Плотность сложения		
	плотные	средней плотности	рыхлые
Пески гравелистые, крупные и средней крупности	$\epsilon < 0,55$	$0,55 \leq \epsilon \leq 0,70$	$\epsilon > 0,70$
Пески мелкие	$\epsilon < 0,60$	$0,60 \leq \epsilon \leq 0,75$	$\epsilon > 0,75$
Пески пылеватые	$\epsilon < 0,60$	$0,60 \leq \epsilon \leq 0,80$	$\epsilon > 0,80$

Критическая пористость песков

Пористость пород может меняться под влиянием естественных и искусственных факторов. Из искусственных факторов следует отметить прежде всего вертикальные и горизонтальные нагрузки от сооружений. Если под влиянием вертикальных нагрузок происходит главным образом уплотнение дисперсных пород, то под влиянием горизонтальных напряжений (сдвиг) в песках пористость может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от плотности их сложения. У рыхлых песков пористость после сдвига в зоне деформации уменьшается, а у плотных песков — возрастает. Очевидно, что должна существовать некоторая промежуточная плотность сложения (пористость), которая при деформации сдвига изменяться не будет. Это промежуточное значение плотности характеризуется так называемой *критической пористостью*, являющейся границей между плотным и рыхлым сложением песка.

Таким образом, под критической пористостью понимается такое значение пористости, при котором в процессе сдвига песка не наблюдается изменение плотности песка (объемного веса или пористости, которые характеризуют плотность сложения).

Считается, что пески с естественной пористостью выше критической являются неустойчивыми и при различных механических воздействиях (вибрации, ударе, землетрясении, ударной волне при взрыве и т. д.) могут уплотняться, вызывая деформации и разрушения расположенных на них сооружений. Особенно опасны в этом отношении водонасыщенные пески, имеющие естественную пористость выше критической. При механическом воздействии они переходят в плавунное состояние вследствие возрастающего гидродинамического давления, вызываемого выжиманием из пор водой (рис. 26, А).

Пески при естественной пористости меньше критической считаются устойчивыми даже в водонасыщенном состоянии. При сдвиге в этих песках возникает гидродинамическое давление, направленное внутрь грунта, вследствие заполнения увеличивающихся пор водой (рис. 26, Б).

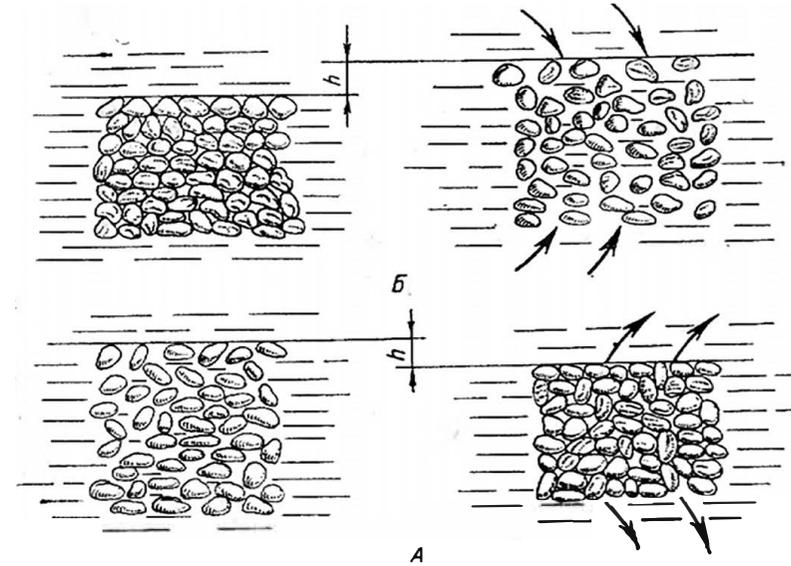


Рис. 26. Схема деформации водонасыщенных песков разной плотности при сдвиге:
А — уплотнение рыхлого песка; Б — разрыхление плотного песка; h — изменение высоты образца (мощности слоя) при сдвиге. Стрелками показано направление движения воды

Критическая пористость определяется в специальных приборах для изучения сопротивления пород сдвигу (см. гл. 15). Для этого в приборе испытывается несколько образцов изучаемого песка различной плотности (объемного веса) и с известными влажностью и удельным весом. В процессе опыта устанавливается характер деформаций (расширение или сжатие) в зоне сдвига.

По результатам опыта строят график зависимости характера вертикальной деформации от объемного веса. Величина критического объемного веса ($\delta_{кр}$) соответствует точке пересечения полученной прямой с осью абсцисс.

Зная значения $\delta_{кр}$, можно подсчитать критическую пористость (рис. 27):

$$\mu_{кр} = \frac{\gamma - \delta_{кр}}{\gamma} \quad \text{или} \quad \epsilon_{кр} = \frac{\gamma - \delta_{кр}}{\delta_{кр}}$$

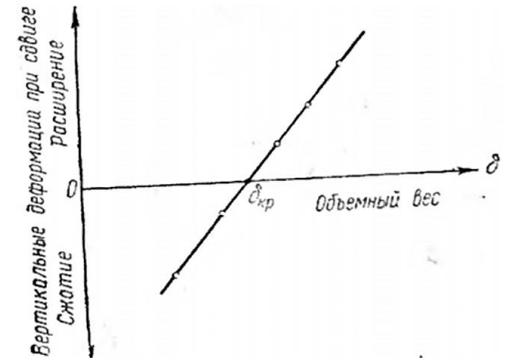


Рис. 27. График определения критической пористости

Относительная плотность и уплотненность песков

При производстве инженерно-геологических исследований иногда прибегают к оценке степени плотности песков и их уплотненности. Эти показатели используются главным образом для классификационных целей.

Для оценки относительной плотности используют следующую формулу:

$$D = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} = \frac{n_{\max} - n (100 - n_{\min})}{(n_{\max} - n_{\min}) (100 - n)}$$

где n и ε — пористость и коэффициент пористости песка в естественных условиях залегания; n_{\max} и ε_{\max} — пористость и коэффициент пористости песка в наиболее рыхлом состоянии; n_{\min} и ε_{\min} — пористость и коэффициент пористости песка в наиболее плотном состоянии.

Коэффициент пористости ε рассчитывается по данным определения удельного и объемного веса на образцах с ненарушенной структурой.

Минимальное и максимальное значения пористости рассчитывают по данным определения соответственно объемного веса при максимальном уплотнении и максимальном разрыхлении образцов изучаемой породы. Относительную пористость можно определить с помощью номограммы (рис. 28).

Уплотняемость песков рассчитывается по формуле

$$F = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\min}}$$

Степень уплотненности глинистых пород

Известно, что прочность глинистых пород зависит от степени их уплотненности. В естественных условиях залегания даже глины одного возраста и генезиса могут быть различными по степени уплотненности, которая зависит от веса вышележащих толщ и сложных процессов диагенеза (табл. 23).

В ходе уплотнения глинистого осадка происходит постепенное увеличение его прочности. При этом физическое состояние породы изменяется. Эти изменения характеризуются определенными границами, при переходе которых наступают качественные изменения физических свойств породы. Такими характерными границами являются переход глинистого осадка из текучего в пластичное состояние и из пластичного в полутвердое и твердое. При инженерно-геологических исследованиях для общего суждения о степени плотности глинистых пород необходима оценка степени естественной уплотненности глинистых пород. В. А. Приклонским предложена для этого специальная формула

$$K_d = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon}{\varepsilon_f - \varepsilon_p}$$

где K_d — показатель уплотненности; ε — коэффициент пористости изучаемой породы; ε_f — коэффициент пористости этой же породы на границе перехода из пластичного состояния в текучее; ε_p — то же, на границе перехода из пластичного состояния в полутвердое.

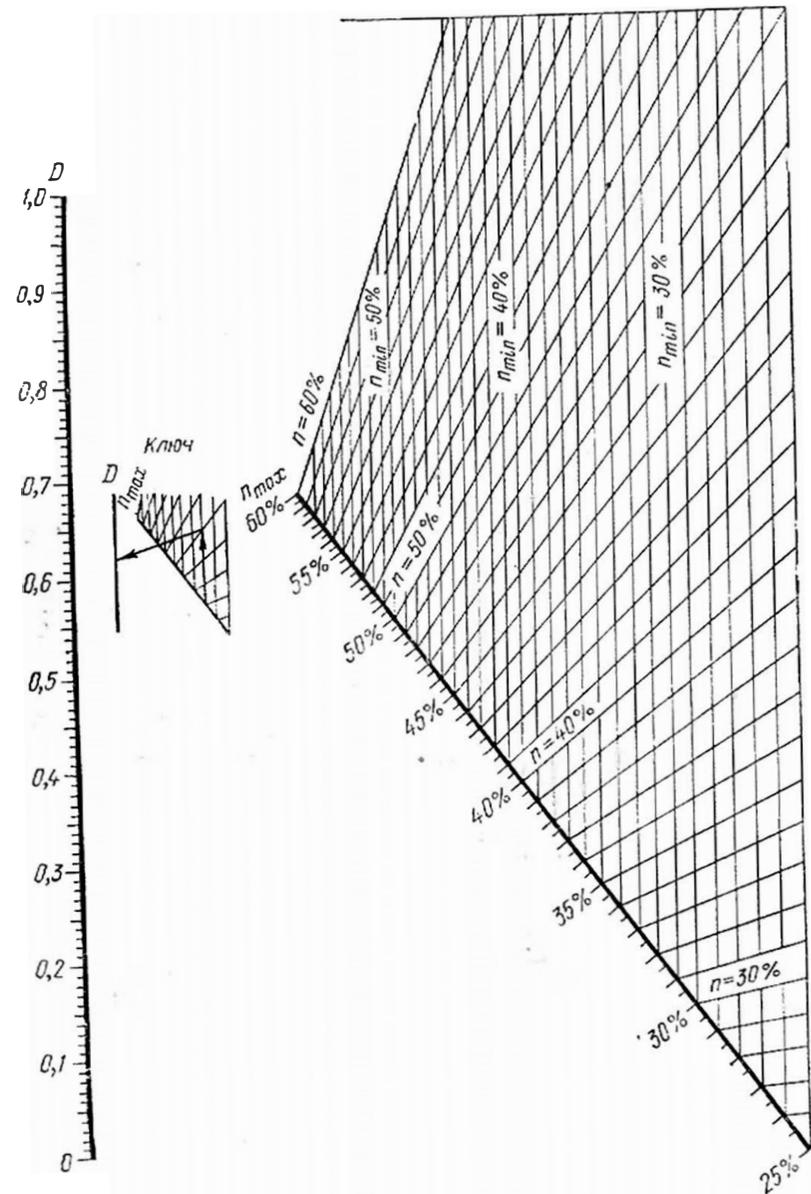


Рис. 28. Номограмма для вычисления относительной плотности песков

Степень уплотненности глинистых пород при разных значениях коэффициента пористости

Коэффициент пористости породы естественного сложения	Коэффициент уплотненности	Степень уплотненности породы
$\varepsilon < \varepsilon_f$ $\varepsilon = \varepsilon_f$ $\varepsilon_p < \varepsilon < \varepsilon_f$	$K_d < 0$ $K_d = 0$ $1 > K_d > 0$	Недоуплотненное состояние Начальная степень уплотнения Средняя степень уплотнения (соответствующая пластичному состоянию)
$\varepsilon = \varepsilon_p$	$K_d = 1$	Уплотненное состояние (соответствующее переходу в полутвердое состояние)
$\varepsilon < \varepsilon_p$	$K_d > 1$	Переуплотненное состояние (твердое и полутвердое)

В табл. 23 приведены данные о степени уплотненности некоторых типов пород на территории СССР, вычисленные В. А. Приклонским.

Степень влажности (относительная влажность)

Степень влажности (G) определяет долю заполнения пор породы водой и характеризуется отношением объема воды в порах к объему пор:

$$G = \frac{V_w}{V_n}$$

Величина G теоретически может изменяться от 0 — абсолютно сухая порода до 1 — все поры заполнены водой. Специальные исследования показывают, что степень влажности пород ниже уровня грунтовых вод (в зоне насыщения) колеблется в пределах от 0,8 до 1,0.

Для определения степени влажности пород предложен ряд зависимостей:

$$G = \frac{W_\delta}{n} = \frac{W_\gamma}{\varepsilon} = \frac{W_\varepsilon(1-n)}{n}$$

где G — степень влажности в долях единицы; W — весовая влажность в долях единицы; ε — коэффициент пористости; n — пористость в долях единицы; γ — удельный вес породы; δ — объемный вес скелета.

Для определения степени влажности может быть использована номограмма (рис. 29).

По СНиПу, нормативное давление на мелкие и пылеватые пески устанавливается в зависимости от степени влажности их. По действующему СНиП II-Б.1 — 62, по степени влажности песчаные грунты разделяются на маловлажные при $G < 0,5$, влажные при $0,5 < G < 0,8$ и очень влажные (насыщенные водой) при $G > 0,8$.

Степень уплотненности некоторых типов пород на территории СССР (по В. А. Приклонскому)

Значения K_d	Степень уплотненности	Типы пород	Характерные признаки и свойства	Примеры пород	Средние значения K
< 0	Низкая — неуплотненные породы	1. Просадочные лёссы и лёссовидные суглинки 2. Молодые четвертичные отложения в водонасыщенном состоянии	Высокая пористость с наличием крупных пор (макропор). Низкая естественная влажность (меньше нижнего предела пластичности); резкое уплотнение при увлажнении (просадочность) с переходом в текучее состояние при нарушении структуры Явно- или скрытотекучее состояние: последнее обнаруживается при нарушении естественной структуры (вибрация, динамическое воздействие и др.); при нарушении естественной структуры прочность уменьшается в несколько раз	Просадочные лёссы в районе Ташкента Некоторые ленточные глины в районе Ленинграда	— 0,67 — 0,25
От 0 до 1	Начальная и средняя степени уплотнения	Большинство глинистых пород в недислоцированных районах, залегающих на небольшой глубине, не метаморфизованы	Явно- или скрытопластичное состояние; последнее обнаруживается в перемыках образце при естественной влажности; под нагрузками сжимаются, дают осадку	1. Аллювиальные отложения 2. Хвалыньские глины 3. Майкопские глины 4. Нижнемеловые глины 5. Верхнеюрские глины до глубины 30 м 6. Каменноугольные глины	0,06 0,80 1,00 0,80 0,92 0,50

Значения K_d	Степень уплотненности	Типы пород	Характерные признаки и свойства	Примеры пород	Средние значения K
> 1	Высокая — сильно уплотненные породы	1. Дислоцированные, неветрелые породы	Полутвердое или твердое состояние; перемятые образцы при естественной влажности пластичной массы не образуют. Сжимаются лишь под нагрузками выше 10—20 кг/см ² . При увлажнении сильно увеличиваются в объеме (набухают) даже под нагрузками порядка 5—10 кг/см ²	1. Морена	1,35
		2. Породы, залегающие на значительной глубине		2. Апшеронские глины	1,60
		3. Моренные глинистые отложения, неветрелые		3. Верхнеюрские глины с глубины 30 м	1,16
		4. Метаморфизованные неветрелые породы	4. Каменноугольные глины с глубины 40—50 м	1,10	

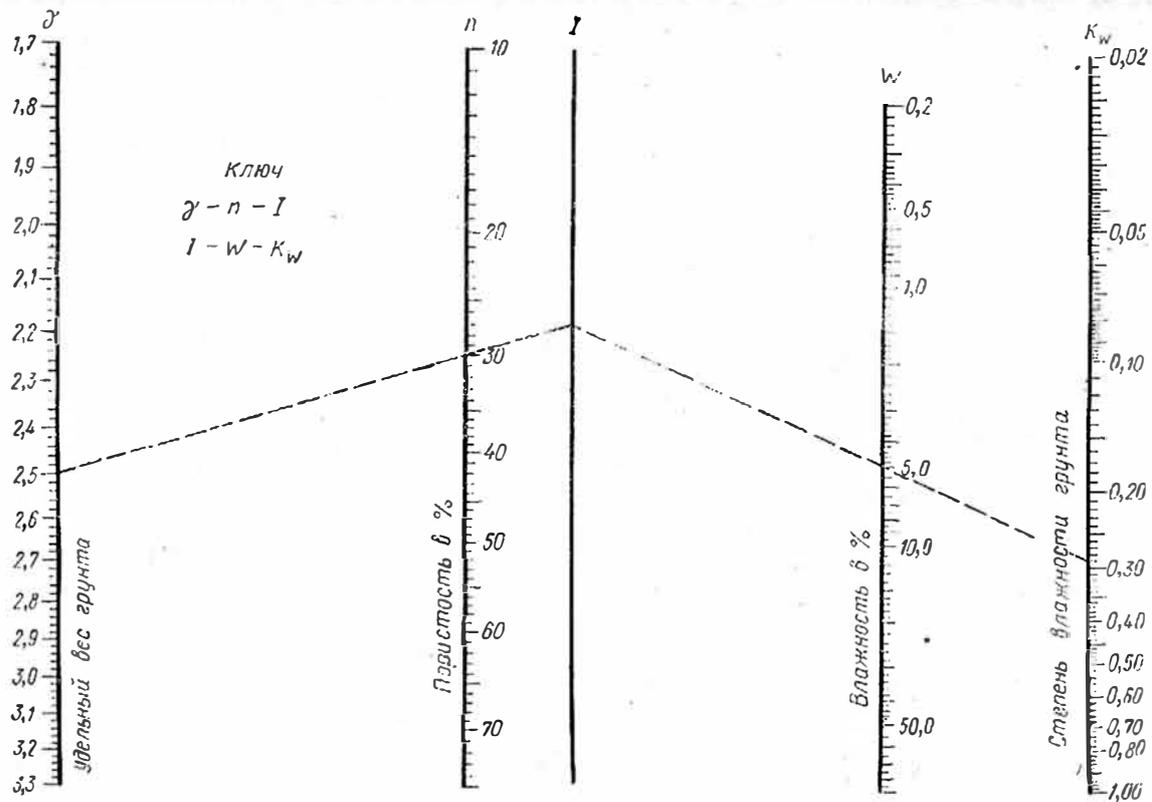


Рис. 29. Номограмма для вычисления степени влажности

1. Основные фазы дисперсной породы и инженерно-геологическое значение различных соотношений между ними.
2. Влажность породы, как она выражается и каково ее значение при оценке состояния породы?
3. Что такое удельный вес горной породы и от чего он зависит?
4. Физическая сущность объемного веса, от чего он зависит и чем отличается от удельного веса?
5. Различие между объемным весом влажной породы и объемным весом скелета породы.
6. Что такое скважность горной породы, каковы разновидности этой скважности и в каких величинах она выражается?
7. Каково инженерно-геологическое значение пористости?
8. Как связаны степень плотности, уплотненность и степень уплотненности с пористостью?
9. Что такое степень влажности пород и ее инженерно-геологическое значение?

Литература

- Коломенский Н. В. Инженерная геология. Ч. 1. М., Гос. изд-во геолог. лит., гл. II, § 3, 4, 5, 6, 7.
- Приклонский В. А. Грунтоведение. Ч. 1. М., Гос. науч.-техн. изд-во лит. по геологии и охране недр, 1955, гл. 13, 14 и 15.
- Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. II, § 5; гл. IV, § 1.

КОНСИСТЕНЦИЯ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Вода оказывает большое влияние на состояние и свойства горных пород. С водой связано возникновение различных инженерно-геологических процессов (растворение, выщелачивание, выветривание, просадки, пльвучесть, набухание и др.). Особенно сильно сказывается влияние воды на свойства и состояние глинистых горных пород. Наблюдается определенная закономерность в изменении состояния глинистых пород в зависимости от изменения влажности. При небольшой влажности эти породы находятся в твердом состоянии, при увлажнении они размягчаются, легко поддаются формовке, а при очень большом переувлажнении могут переходить в текучее состояние, подобно жидкости. Эта закономерность отчетливо проявляется у молодых неуплотненных глинистых осадков, а также у глин с нарушенной структурой (перемятых глин). У коренных уплотненных глинистых пород с ненарушенной структурой эти состояния при изменении влажности не проявляются вследствие наличия структурных связей, сцепления, а поэтому некоторые глины даже при очень большом увлажнении (полном заполнении пор водой) в природном состоянии производят впечатление твердых тел. После нарушения структурных связей такая глинистая порода может перейти в мягкое состояние или даже в текучее без дополнительного ее увлажнения. Эти изменения физического состояния глинистых пород характеризуются определенными формами консистенции.

Под *консистенцией* понимают степень подвижности частиц, слагающих глинистую породу, под влиянием внешнего механического воздействия при различной влажности.

Формы консистенции и характерные влажности

Из приведенного выше определения следует, что формы консистенции определяют механические свойства глинистых пород, их поведение под нагрузками от сооружений.

Различают три основных формы консистенции: *твердую, пластичную* и *текучую*, а также ряд промежуточных: *полутвердую, тугопластичную, мягкопластичную* и *текучепластичную*.

Границам различных форм консистенции соответствуют характерные значения влажности, определяющие момент перехода породы из одного состояния в другое. Характерные влажности представляют собой отношение веса воды к весу сухой породы, выражаются

в процентах и называются пределами, или границами, различных форм консистенции.

В практике инженерно-геологических исследований и при проектировании оснований сооружений наиболее часто используют *пределы пластичности*.

Пластичностью называют способность некоторых пород изменять свою форму — деформироваться без разрыва сплошности (без образования трещин) под влиянием внешнего воздействия и сохранять эту форму после прекращения этого воздействия.

Как видно из этого определения, пластичность характеризует остаточные деформации. Пластичные свойства глин определяют возможность использования этих пород для художественной лепки, в гончарном и керамическом производстве. От пластичности зависит выбор нормативных давлений при проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений.

Пластичностью обладают только глинистые породы, лёссы и лёссовидные породы, глинистые мергели и мел. Для количественной характеристики пластичности введено понятие «предел пластичности». Различают верхний предел пластичности, или границу текучести, нижний предел пластичности, или границу раскатывания, и число пластичности.

Под *верхним пределом пластичности*, или *границей текучести*, понимают значение влажности, при которой порода переходит из пластичного состояния в текучее.

Верхний предел пластичности обозначается буквой W_f и представляет собой отношение веса воды, при которой порода переходит в текучее состояние, к весу породы, высушенной при 105°C . Выражается в процентах.

Нижним пределом пластичности, или *границей раскатывания*, называют влажность, при которой порода переходит из пластичного состояния в твердое.

Нижний предел пластичности обозначается буквой W_p и также выражается в процентах весовой влажности.

Числом пластичности называют интервал влажности, в пределах которого порода находится в пластичном состоянии. Обозначается буквой M_p и численно равно разности между значениями влажности верхнего и нижнего пределов пластичности. Выражается в процентах. Чем больше число пластичности, тем более пластичен грунт.

Факторы, определяющие пластичность

Пластичность глинистых и других пород обусловлена наличием вокруг минеральных частиц породы очень тонких гидратных оболочек. Чем толще эти оболочки, тем пластичнее порода.

К основным факторам, определяющим степень пластичности пород, относятся: гранулометрический состав, минералогический состав, форма частиц, состав обменных катионов, химический состав и концентрация солей порового раствора (воды в порах породы).

Гранулометрический состав, или *степень дисперсности*, — это один из наиболее важных факторов, определяющих пластичность. Пластичные свойства начинают наиболее интенсивно проявляться у фракций размером менее 0,05 мм. По мере уменьшения размеров частиц пластичность породы увеличивается. Очень сильно увеличивают пластичность коллоидные фракции, которые связывают значительное количество воды в гидратных оболочках.

В табл. 24 приведены данные, характеризующие зависимость пластичности от степени дисперсности породы.

Таблица 24

Пластичность каолиновых глин (по П. А. Земляченскому)

Наименование глин	Содержание частиц размером <0,005 мм, %	Число пластичности, %	Наименование глин	Содержание частиц размером <0,005 мм, %	Число пластичности, %
Глуховская	99,0	30,0	Байковская № 4	53,2	9,0
Латинская «отборная»	80,3	18,5	Байковская № 6	40,2	7,8
Латинская «прима»	65,6	15,0			

Минералогический состав. Так как различные минералы неодинаково интенсивно связывают воду, то минералогический состав глинистых фракций в значительной мере определяет пластичность породы в целом. Различные минералы при одинаковой степени дисперсности обладают различной пластичностью. Наибольшей пластичностью обладают вторичные глинистые минералы. Кварц практически не пластичен. В табл. 25 приведены данные, характеризующие пластичность некоторых минералов.

Таблица 25

Пластичность частиц меньше 0,002 мм различного минералогического состава (по Аттербергу)

Название минерала	Верхний предел пластичности, %	Нижний предел пластичности, %	Число пластичности
Биотит	87	44	43
Хлорит	72	47	25
Каолинит	63	43	20
Лимонит	36	27	9
Кварц	35	35	0

Форма частиц. Форма частиц в определенной степени также влияет на проявление свойств пластичности.

Как известно, каждый минерал характеризуется определенным строением кристаллической решетки, от которой зависит форма частиц. Наибольшей пластичностью обладают минералы, у которых

частицы имеют пластинчатую, чешуйчатую форму. Однако некоторые минералы, например полевые шпаты, имеющие пластинчатую форму, практически не обладают свойством пластичности. Таким образом, форму частиц нельзя считать основным фактором, определяющим пластичность, как это ранее считали некоторые исследователи (Аттерберг, Терцаги и др.).

Состав обменных катионов. Пластичность пород изменяется в зависимости от состава обменных катионов. По своей способности придавать минеральным частицам пластичные свойства наиболее часто встречаемые в породах катионы располагаются в следующей последовательности:



Эта закономерность отражает изменения содержания рыхлосвязанной воды и дисперсности пород, которые наблюдаются при замещении одних катионов другими. Как видно из этого ряда, наибольшее влияние на увеличение пластичности оказывают одновалентные катионы, наименьшее — трехвалентные. Исключение составляет водород, который по способности сообщать породе пластичность располагается между двух- и трехвалентными катионами. Из наиболее распространенных в породах поглощенных оснований Na^+ и Ca^{+2} оказывают диаметрально противоположное воздействие на проявление пластичности. Поглощенный натрий резко увеличивает пластичность породы, а поглощенный кальций уменьшает. Пластичность глин повышается при увеличении общей емкости поглощения.

Таблица 26

Влияние обменных катионов и концентрации раствора на пластичность глин (по И. В. Попову)

Характер подготовки образца	Концентрация раствора NaCl при определении пределов	Пределы пластичности и название глин					
		верхний предел		нижний предел		число пластичности	
		каолин-новая*	монтмориллонитовая**	каолин-новая*	монтмориллонитовая**	каолин-новая*	монтмориллонитовая**
Замешаны на дистиллированной воде	Дистиллированная вода	55	110	33	55	22	55
Насыщены Na^+	3N	54	77	33	47	21	30
	0,5N	58	117	33	49	25	68
	0,01N	62	314	38	50	24	264
Насыщены Ca^{+2}	3N	53	83	38	45	15	38
	0,5N	56	95	37	55	19	40
	0,01N	61	98	37	55	24	44

* Емкость обмена глины 4 мг-экв на 100 г.
 ** Емкость обмена глины 86 мг-экв на 100 г.

Состав и концентрация водного раствора. Состав и концентрация солей в водном растворе также влияют на проявление пластичности, так как определяют толщину гидратных оболочек и состав обменных катионов. Присутствие в водном растворе большого количества солей вызывает уменьшение толщины диффузного слоя, уменьшает гидратные оболочки и снижает пластичность пород. Уменьшение концентрации солей вызывает увеличение гидратных оболочек и усиливает пластичные свойства породы.

Пластичность глин, определяемая с помощью дистиллированной воды, значительно выше пластичности тех же глин, определяемой с помощью раствора NaCl.

В табл. 26 приведены данные, иллюстрирующие зависимость пластичности от обменных катионов и концентрации солей.

Практическое использование пределов пластичности

Формы консистенции и характеризующие их пределы представляют интерес с точки зрения их связи с механическими свойствами и прочностью пород. Пределы пластичности используются для решения следующих практических задач:

1) для классификации глинистых пород; 2) для определения нормативных давлений на глинистые породы при проектировании фундаментов сооружений на них; 3) для приблизительного определения степени естественной уплотненности глинистых пород, их водопроницаемости и других свойств глинистых пород.

По СНиП II-Б.1—62, глинистые грунты классифицируются по числу пластичности (табл. 27).

Как показывают исследования, прочность глинистых пород снижается с повышением влажности, т. е. с изменением консистенции. Поэтому, чтобы судить о прочности породы, необходимо выяснить форму консистенции породы в естественных условиях. Для этого надо было бы сравнить естественную влажность породы с характерными влажностями, т. е. с пределами пластичности, характеризующими границы эластичного состояния породы, и считать, что при $W < W_p$ порода находится в твердой консистенции, при $W_p < W < W_f$ — в пластичной консистенции и при $W > W_f$ — в текучей консистенции. Однако при таком сравнении не учитывается уменьшение прочности породы, вызываемое перемятием образцов и нарушением структурных связей, происходящих при современной методике определения пределов пластичности. Кроме того, порода пластичной консистенции может по значению естественной влажности в одном случае быть ближе к нижнему пределу пластичности (граница раскатывания), в другом — к верхнему пределу пластичности (граница текучести) и, следовательно, в обоих случаях будет

Таблица 27

Виды глинистых грунтов

Наименование глинистых грунтов	Число пластичности M_p
Супесь	$1 \leq M_p \leq 7$
Суглинок	$7 \leq M_p \leq 17$
Глина	$M_p > 17$

обладать различными свойствами. Например, представим себе, что оцениваются свойства глины, имеющей распространение на значительной площади. Пределы пластичности этой глины определены как средние из большого числа анализов. Они равны: $W_p=30\%$ и $W_f=60\%$. Естественная влажность глины оказалась равной на одном участке $W_1=32\%$ и на втором $W_2=58\%$. Сравнение значений влажности показывает, что они больше нижнего предела пластичности и меньше верхнего предела, т. е. глина находится в пластичном состоянии, но при $W_1=32\%$ она будет ближе к твердому состоянию, так как влажность ее всего на 2% больше нижнего предела пластичности, а при $W_2=58$ — ближе к текучему состоянию, так как влажность всего на 2% меньше верхнего предела пластичности (границы текучести). Естественно что в обоих случаях поведение глины под нагрузкой от сооружения будет различным, и, следовательно, оценивать состояние глины только путем сравнения естественной влажности с пределами пластичности нельзя. Для этой цели предложены специальные показатели, которые указывают степень приближения естественной влажности к нижнему или верхнему пределу пластичности. Эти показатели называют *показателями консистенции*.

В. А. Приклонским предложен показатель консистенции

$$B = \frac{W_f - W}{M_p}$$

По СНиП II-Б.1 — 62, показатель консистенции глинистых непросадочных пород определяется по формуле

$$B = \frac{W - W_p}{M_p}$$

В зависимости от этого показателя глинистые непросадочные породы подразделяются на группы (табл. 28).

Таблица 28

Консистенции пород по СНиП II-Б.1—62

Наименование пород и их консистенция	Величина показателя консистенции
<i>Супеси</i>	
Твердые	$B < 0$
Пластичные	$0 \leq B \leq 1$
Текучие	$B > 1$
<i>Суглинки и глины</i>	
Твердые	$B < 0$
Полутвердые	$0 \leq B \leq 0,25$
Тугопластичные	$0,25 < B \leq 0,50$
Мягкопластичные	$0,50 < B \leq 0,75$
Текуче-пластичные	$0,75 < B \leq 1$
Текучие	$B > 1$

В зависимости от величины показателя консистенции по действующему СНиПу производится выбор нормативного давления при

проектировании естественных оснований фундаментов зданий и сооружений.

Как уже указывалось выше, при расчетах консистенции путем сравнения пределов пластичности с естественной влажностью не учитываются структурные связи (сцепление упрочнения) и тем самым снижается их действительная прочность, которой они обладают в естественных условиях залегания. Поэтому данными о консистенции глинистых пород надо пользоваться с большой осторожностью и при оценке породы учитывать не только лабораторные показатели, но и геологические данные (условия залегания; состояние породы в образце с ненарушенной структурой и т. д.).

Некоторые специалисты считают, что глинистые породы в природных условиях залегания — в массиве — могут иметь любую консистенцию: твердую, пластичную или текучую; была бы только соответствующая степень увлажнения. Ошибочность этих представлений вытекает из неправильной оценки поведения породы в образце и в естественных условиях залегания на той или иной глубине. В образце порода может свободно набухать и напитываться водой до тех пор, пока все гидратные оболочки не достигнут своего максимально возможного размера. На глубине возможность насыщения водой ограничена естественной пористостью породы, а возможность дополнительного поглощения воды за счет набухания исключается вследствие давления всей вышележащей толщии пород. Поэтому в естественных условиях залегания возможность изменения консистенции породы, как правило, ограничена. Возможность эта зависит от степени уплотнения. Если порода слабо уплотнена (илы, молодые аллювиальные, озерные и морские глины и суглинки), то возможность перехода в любую консистенцию в естественных условиях залегания не ограничена; если же порода сильно уплотнена, то она может быть только в твердой или пластичной консистенции, но перейти в текучую консистенцию при бытовом давлении и сохранении естественной структуры не может.

Для определения уплотненности В. А. Приклонский предложил формулу, в которой учитываются два наиболее характерных состояния — текучее и полутвердое. Формула эта и значение коэффициента уплотненности в зависимости от значений коэффициента пористости рассмотрены выше, в гл. 7.

Методы определения пределов пластичности

Методы определения характерных влажностей на пределах пластичности подразделяются на косвенные и прямые.

Среди косвенных методов определения пластичности большое распространение имеет метод Аттерберга. Метод определения нижнего предела пластичности по Аттербергу несколько видоизменен и в настоящее время стандартизован (ГОСТ 5183—49). Сущность этого метода состоит в раскатывании увлажненного глинистого теста в жгут толщиной 3 мм. Влажность, при которой жгут ука-

занной толщины начинает крошиться, терять способность к пластичным деформациям, считается нижним пределом пластичности.

Верхний предел пластичности, по Аттербергу, определяется путем наблюдения за заплыванием борозды, проведенной специальным шпателем в глиняном тесте определенной толщины, помещенном в фарфоровую чашку, при встряхивании этой чашки.

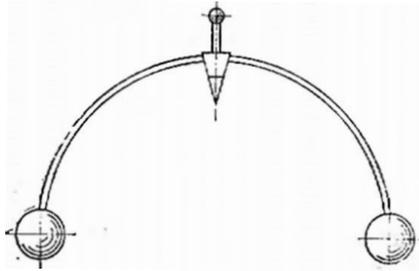


Рис. 30. Балансирный конус для определения верхнего предела пластичности

по ГОСТ 5184—49 с помощью балансирного конуса, изображенного на рис. 30. Конус этот погружается в подготовленную для опыта пасту изучаемой породы под влиянием собственного веса. Увеличивая или уменьшая влажность этой пасты, добиваются погружения конуса на глубину 10 мм за время 5 с. Влажность породы, соответствующая этому моменту, принимается за значение влажности, отвечающей верхнему пределу пластичности (границе текучести).

Контрольные вопросы

1. Что такое консистенция и какими показателями она характеризуется?
2. Нижний предел пластичности и способы его определения.
3. Верхний предел пластичности и способы его определения.
4. Основные факторы, определяющие пластичные свойства пород.
5. Для решения каких задач используются показатели пластичности?
6. Основные недостатки методики определения пределов пластичности.

Литература

Приклонский В. А. Грунтоведение. Ч. I. М., Гос. изд-во лит. по геологии и охране недр, 1955, гл. 18.
Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Знангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. VI, § 3; гл. III, § 2, п. 8.

встряхивание производится вручную при соблюдении стандартных условий. Для исключения субъективного влияния исследователя на результат опыта метод Аттерберга был позднее несколько видоизменен и ручное встряхивание заменено специальными приспособлениями (приборы В. В. Охотина, А. М. Васильева, Казагранде и др.).

В настоящее время определение верхнего предела пластичности производится

Вода оказывает большое влияние на свойства и состояние горных пород. Циркулируя в порах и трещинах, она находится в постоянном взаимодействии с породами. Это взаимодействие вызывает качественные и количественные изменения как в горных породах, так и в подземных водах.

С влиянием воды связано возникновение таких процессов, как растворение и выщелачивание, суффозия, просадки лёссовидных пород, образование пльвунов и оползней, изменение концентрации солей, набухание и размокание глинистых пород, выветривание и др. Все эти процессы вызывают изменение прочности и устойчивости пород.

Значительная часть из указанных выше процессов рассматривается в курсах гидрогеологии и инженерной геологии. Грунтоведение изучает главным образом влияние воды на горные породы в отношении устойчивости, сохранения структуры и прочности, а также способность пород поглощать воду и пропускать ее сквозь себя, т. е. так называемые водные свойства пород, из которых пластичность и капиллярные свойства были описаны в предыдущих главах. Ниже рассматриваются растворимость, набухание, усадка, просадка, размокание, водопроницаемость, влагоемкость и водоотдача.

Растворимость пород

Подземные воды обладают большой растворяющей способностью. Теоретически почти все горные породы растворяются в подземных водах, однако степень и скорость растворения различны. Одни породы растворяются быстро (например, каменная соль), другие медленно (известняки) и, наконец, третьи (граниты) растворяются настолько медленно, что практически считаются нерастворимыми. Процесс растворения зависит от характера породы, свойств воды — ее химического состава, общей минерализации, температуры, скорости движения, растворенных в воде газов, барометрического давления и т. д.

Способность воды растворять минералы или горные породы, а также различные искусственные строительные материалы (цемент, бетон и др.) называют *агрессивной способностью*.

Вода обладает агрессивной способностью по отношению к данной породе только в том случае, если она не насыщена солью, содержащейся в породе. Так, вода, насыщенная карбонатом кальция, не будет растворять при данной температуре и при данном давлении

нии известняк; вода, насыщенная сульфатом кальция, не растворяет гипс.

При больших скоростях и турбулентном движении воды по породам растворяющая способность ее при прочих равных условиях увеличивается.

Повышение температуры способствует увеличению растворяющей способности воды. Если вода содержит газы (например, CO_2), которые при повышении температуры улетучиваются, растворяющая способность воды при увеличении температуры может уменьшаться. Например, растворимость магнезита в воде, насыщенной CO_2 , при нормальном давлении изменяется от 8,1 г/л при температуре воды 70°С до 2,4 г/л при температуре 90°С, а при 100°С она составляет всего сотые и тысячные доли грамма на литр воды.

Различают *полное растворение* всей породы и *частичное растворение*, называемое *выщелачиванием* (растворяются отдельные минералы породы).

Следует различать также *прямое* и *диффузное выщелачивание* (растворение).

Прямое выщелачивание, или растворение (рис. 31, б), происходит при непосредственном соприкосновении движущейся подземной воды с растворимой породой (ми-

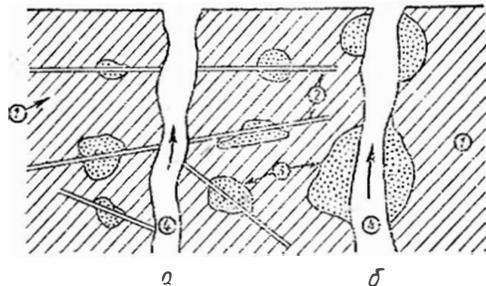


Рис. 31. Схема диффузного (а) и прямого (б) растворения:

1 — нерастворимая порода; 2 — макропоры (ультракапилляры), содержащие связанную воду; 3 — гезза легкорастворимой соли; 4 — крупные трещины, по которым фильтруется свободная слабоинерализованная вода

нералом). Диффузное выщелачивание, или растворение (рис. 31, а), идет без прямого соприкосновения свободной воды с растворимой породой. Этот процесс возникает в результате падения концентрации солей в поровом растворе, заключенном в микропорах, под влиянием движущейся по трещинам и макропорам свободной воды, т. е. происходит движение ионов по схеме: порода → поровый раствор → свободная вода.

Прямое и диффузное растворение и выщелачивание сопровождаются изменением инженерно-геологических свойств пород: увеличивается кавернозность, уменьшается прочность, увеличивается водопроницаемость, в глинистых породах увеличивается их сжимаемость, уменьшается сцепление и т. д.

Возможность такого изменения свойств пород определяет условия строительства сооружений в районах распространения растворимых пород. Изучение процессов выщелачивания и растворения производится в лабораторных условиях путем постановки моделирующих опытов.

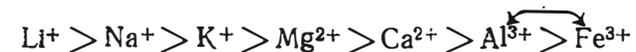
Набухание

Под *набуханием* понимают увеличение объема породы при воздействии воды. Свойство набухания характерно для глинистых пород и некоторых слабосцементированных осадочных пород с глинистым цементом. При набухании происходит увеличение пористости породы и ее влажности в связи с увеличением толщины гидратных оболочек на поверхности глинистых частиц. Увеличивающиеся гидратные оболочки связанной воды уменьшают силы сцепления между частицами породы, раздвигают их и этим вызывают увеличение объема породы.

Набухание зависит от соотношения между концентрацией растворимых солей в поровом растворе породы и в свободной воде, воздействующей на породу. Максимальное набухание происходит в дистиллированной воде; по мере увеличения концентрации солей в воде набухание одной и той же породы уменьшается. Если концентрация солей порового раствора и свободной воды будет одинаковой, набухания происходить не будет. Наконец, если концентрация внешнего раствора окажется больше концентрации порового раствора, вместо набухания можно ожидать усадку, т. е. уменьшение объема вследствие уменьшения толщины гидратных оболочек (как при высыхании).

В образцах с нарушенной структурой набухание больше, чем в образцах той же глинистой породы, но с ненарушенной структурой. Ненарушенные структурные связи уменьшают возможность набухания.

Набухание зависит также от минералогического и гранулометрического состава, состава обменных ионов и других факторов. Как уже было сказано выше, набухание свойственно глинистым частицам ($d < 0,005$ мм). Из глинистых минералов наибольшим набуханием характеризуются минералы группы монтмориллонита, наименьшим — минералы группы каолинита. Чем выше дисперсность частиц, слагающих породу, тем больше набухание. По способности увеличивать набухание наиболее часто встречающиеся в дисперсных породах катионы можно расположить в следующей последовательности:



Наибольшей способностью к набуханию обладают одновалентные катионы, наименьшей — трехвалентные.

Явления набухания имеют практическое значение при вскрытии глинистых пород в котлованах, в горных выработках, при строительстве каналов и других гидротехнических сооружений.

Для характеристики набухания изучают: 1) давление набухания, т. е. то давление, которое развивается в породе при набухании; 2) влажность набухания — влажность набухшей породы; 3) величину набухания — отношение приращения объема набухшей породы к ее первоначальному объему, т. е.

$$\frac{V_{\text{наб}} - V_0}{V_0} \cdot 100\%$$

где $V_{\text{наб}}$ — объем набухшей породы и V_0 — первоначальный объем породы до набухания.

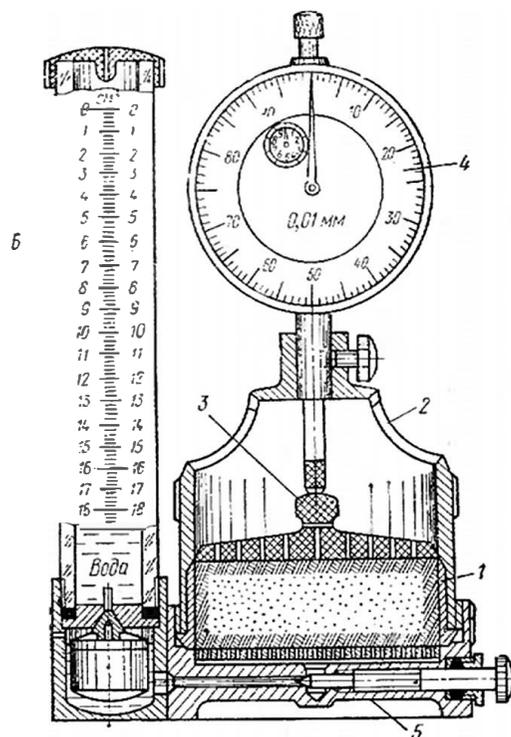


Рис. 32. Прибор ПНЗ-2 для определения набухания:

1 — кольцо с образцом породы; 2 — крышка прибора; 3 — пластмассовый пористый; 4 — индикатор для измерения набухания; 5 — дно прибора с кольцом для впуска воды в кольцо прибора с породой и водомерной трубкой 6

Для изучения этих характеристик образец породы помещают в специальный прибор (рис. 32), подводят к нему воду и с помощью индикатора определяют величину набухания, а после окончания набухания — влажность образца, которая (с учетом начальной влажности образца) будет характеризовать набухания. Для определения давления набухания образец помещают под пресс и определяют давление, развиваемое набухающим образцом.

Усадка

Усадкой называется уменьшение объема породы при высыхании. Это процесс, противоположный набуханию. Он характерен для глинистых пород и для пород с глинистым цементом. Усадка сопровождается обра-

зованием в породе трещин. Растрескивание породы снижает ее прочность, повышает водопроницаемость и уменьшает устойчивость пород на естественных склонах, в бортах карьеров, котлованов, откосах и выемках. В результате растрескивания пород под влиянием усадки на склонах образуются рыхлые продукты растрескивания — глинистая щебенка, которая осыпается по склонам, образуя большие скопления. В горных условиях эти скопления служат материалом для образования грязекаменных — селевых потоков (сели, муры). Двигаясь вниз по склонам и ущельям, селевые потоки развивают огромные скорости, захватывают крупнообломочный материал и на пути своего движения разрушают инженерные сооружения, селения, заносят русла рек и уничтожают сельскохозяйственные поля.

уменьшением объема или длины образца изучаемой породы, которое выражается соответственно отношением уменьшения объема или длины образца к его первоначальному объему или длине, т. е.

$$\Delta V = \frac{V_0 - V_y}{V_0} \cdot 100\%,$$

$$\Delta l = \frac{l_0 - l_y}{l_0} \cdot 100\%,$$

где ΔV и Δl — объемная и линейная усадки, V_0 и l_0 — начальные объем и длина образца, V_y и l_y — объем и длина того же образца после усадки.

Уменьшение размеров образца в процессе усадки для данной породы зависит от начальной влажности. Чем больше начальная влажность, тем больше усадки.

Определяющие усадки производятся путем замера линейных размеров образца изучаемой породы и его объема до высушивания и после высушивания до постоянного веса. Определять усадку рекомендуется параллельно на образцах с нарушенной и ненарушенной структурами. Сравнение результатов такого изучения позволяет судить о влиянии структуры и структурных связей на усадку породы.

Размокание и размягчаемость глинистых горных пород

Если поместить образцы различных глинистых горных пород в воду, то можно заметить, что одни из них не будут испытывать каких-либо заметных внешних изменений, другие будут разрушаться, через некоторое время начнут утрачивать связность, будут распадаться на отдельные кусочки, агрегаты и элементарные частицы — хлопья и зерна. Этот процесс распада породы в воде называют *размоканием*. Размокание характеризует водостойкость глинистых пород. По своей природе процесс размокания близок к процессу набухания. Отличие заключается в том, что при размокании вследствие свободного и неограниченного воздействия воды минеральные частицы породы выходят из сферы взаимного молекулярного притяжения до полной потери связей между ними. При набухании связи сохраняются.

Способностью к размоканию обладают главным образом связанные глинистые породы (глины, суглинки, супеси), а также некоторые слабосцементированные осадочные породы с глинистым цементом (конгломераты, песчаники, мергели, аргиллиты).

У некоторых пород размокание вызывает резкое снижение прочности без каких-либо признаков физического распада. Этот процесс в отличие от собственно размокания называется *размягчением*. Способностью к размягчению обладают некоторые типы осадочных сцементированных горных пород (песчаники, аргиллиты, алевролиты и др.).

По СНиП II-Б.1 — 62, размягчаемыми называются скальные породы, у которых отношение временного сопротивления одноосному сжатию в насыщенном водой состоянии к временному сопротивлению одноосного сжатия в воздушно-сухом состоянии меньше 0,75.

Способность пород к размоканию зависит от минералогического и гранулометрического состава, естественной влажности породы, ее структуры, типа цемента, состава обменных ионов, химического состава и минерализации воды, воздействующей на породу.

Опыты, проведенные по изучению влияния этих факторов (Н. В. Коломенский, В. С. Шаров и др.) на размокание, показали, что начальная влажность повышает водоустойчивость. При большой начальной влажности большинство пород не размокает.

Для каждой глинистой породы характерна некоторая критическая влажность. Образцы с влажностью ниже критической размокают, образцы с влажностью выше критической не размокают.

При одинаковой начальной влажности в сильно минерализованных водах водоустойчивость глин выше, чем в слабо минерализованной воде. Наименьшая водоустойчивость наблюдается в дистиллированной воде.

Наименьшей водоустойчивостью независимо от начальной влажности характеризуются глинистые породы, у которых в диффузном слое содержатся одновалентные катионы.

Характер размокания глин, содержащих в поглощенном комплексе двух- и трехвалентные катионы, зависит от влажности. Влажные глины с поглощенным Ca^{2+} или Mg^{2+} размокают слабо, а влажные глины с поглощенным Al^{3+} или Fe^{3+} не размокают. Сухие глины как с двух-, так и трехвалентными катионами быстро размокают.

Изучение размокания пород необходимо при вскрытии их выемками и котлованами, откосы и дно которых могут смачиваться водой. Смачивание может ослабить породы в верхней части вскрытой толщи и, как следствие, вызвать дополнительный объем земляных работ.

Исследование размокаемости ведут также при изучении переработки берегов и при изысканиях по трассам каналов.

Образец породы помещают в воду и наблюдают за характером распада породы в воде и временем, в течение которого происходит распад — размокание породы.

Водопроницаемость

Под *водопроницаемостью* пород понимают способность пород пропускать — фильтровать воду по имеющимся в них порам, трещинам и другим пустотам.

Фильтрация воды в породах происходит под влиянием следующих факторов: силы тяжести — гравитационное передвижение воды; разности напоров; сжатия породы внешним давлением, приложенным к ней; капиллярных сил, развивающихся на поверхности раздела вода — воздух; осмотических сил, обусловленных разностью концентраций растворенных в воде веществ; электрического

тока, вызывающего электрокинетические явления, и других факторов (изменение температуры — конвекционные токи, испарение, замерзание и пр.).

Водопроницаемость грунтов, как известно из курса гидрогеологии, характеризуется *коэффициентом фильтрации (K)*, под которым понимают количество воды, проходящее в единицу времени через сечение, равное единице, при напорном градиенте, равном единице (либо скорость фильтрации при напорном градиенте, равном единице).

Изучением законов передвижения гравитационной — свободной воды занимается гидрогеология. В инженерно-геологической практике приходится также иметь дело с изучением водопроницаемости пород с точки зрения передвижения гравитационной воды. Однако не меньший интерес с инженерно-геологической точки зрения представляет передвижение воды и под влиянием других причин, перечисленных выше, и прежде всего передвижение связанной воды в глинистых породах под действием нагрузок от сооружений, электроосмотических, а также капиллярных сил. Передвижение воды под влиянием этих причин вызывает целый ряд инженерно-геологических процессов: осадки сооружений, просадки лёссовых пород, капиллярное увлажнение сооружений, пучины, засоление орошаемых земель. Разработка мер борьбы с указанными неблагоприятными процессами требует изучения причин, их вызывающих.

С точки зрения водоснабжения, т. е. извлечения из горных пород воды как полезного ископаемого, вода, содержащаяся в глинах и глинистых породах, практического интереса не представляет, так как, несмотря на высокую пористость, глины очень слабо водопроницаемы, содержат главным образом связанную воду, которая выделяется из них при больших давлениях и в весьма небольших количествах.

Величина водопроницаемости различных пород колеблется в широких пределах. Она зависит от целого ряда факторов, из которых главными в рыхлых породах являются размер и форма зерен, размер и форма пор, структура породы, в скальных и полускальных породах — характер, размер и форма пор, трещин и других пустот. Чем больше размер зерен и чем однороднее порода, тем больше ее водопроницаемость. Окатанные зерна увеличивают водопроницаемость рыхлых пород, остроугольные неправильной формы зерна уменьшают ее. Водопроницаемость резко снижается в неоднородных по гранулометрическому составу рыхлых породах, у которых промежутки между крупными зернами заполнены более мелкими. При глинистом заполнителе большое значение имеет состояние этих частиц: в скоагулированном состоянии они обладают большей водопроницаемостью, чем в диспергированном. Эта особенность непосредственно связана с составом обменных катионов в глинистых породах. Обменный Na^+ оказывает диспергирующее воздействие на глинистые породы и, как следствие, вызывает уменьшение их водопроницаемости; обменный Ca^{2+} , наоборот, вызывает коагуляцию и увеличение водопроницаемости. Наличие в глинистой фракции

сильно набухающих минералов (группа монтмориллонита) вызывает уменьшение водопроницаемости. Аналогичное влияние оказывают органические вещества.

В связных — структурных породах водопроницаемость неоднородна в различных направлениях. Такие породы называют анизотропными в отношении водопроницаемости. Наиболее характерными породами, обладающими этой особенностью, являются лёссы, лёссовидные суглинки и ленточные глины. Явление фильтрационной анизотропии в этих породах обусловлено особенностями их структуры. В лёссах и лёссовидных суглинках оно вызвано наличием крупных пор — макропор, ориентированных вертикально и образующих как бы вертикальные каналы (рис. 33, А), по которым фильтрация значительно больше, чем в горизонтальном направлении, т. е. по направлению, перпендикулярном к направлению каналов. Разница в водопроницаемости по этим двум направлениям в лёссовых породах достигает 30 и более раз.

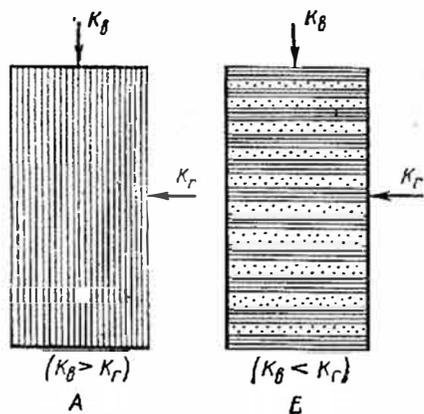


Рис. 33. Схема соотношения фильтрационных свойств анизотропных пород — лёсса (А) и ленточных глин (Б):

K_v — коэффициент фильтрации в вертикальном направлении; K_r — коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении

рации воды через такие породы происходит значительная потеря напора, который затрачивается на проталкивание пузырьков газа.

Водопроницаемость зависит также от температуры фильтрующейся воды. При низких температурах увеличивается вязкость воды, в силу чего водопроницаемость уменьшается.

Величина водопроницаемости различных грунтов колеблется в широких пределах (табл. 29).

Ф. П. Саваренский (1935) по степени водопроницаемости подразделил все породы на три группы.

1. Водопроницаемые — коэффициент фильтрации больше

В ленточных глинах, представляющих горизонтальное переслаивание тонких песков с глинистым материалом, наблюдается обратная картина: водопроницаемость в горизонтальном направлении больше, чем в вертикальном (рис. 33, Б).

Фильтрационная неоднородность может наблюдаться во всех слоистых породах; в породах с наличием сланцеватости, с одним преобладающим направлением трещиноватости и пр.

Присутствие в порах породы воздуха и связанной воды снижает водопроницаемость. Вода и воздух, занимая часть пор, делают их недоступными для просачивания свободной воды. Кроме того, при фильтрации

1 м/сут. К ним относятся все трещиноватые скальные породы, крупнообломочные, галечники, пески.

Таблица 29

Фильтрационная способность некоторых пород

Название грунта	Приблизительное значение коэффициента фильтрации, м/сут
Сильнотрещиноватые закарстованные известняки	200—300 и более
Хорошо промытый галечник без заполнителя	100 и более
Гравийно-галечные отложения с песчаным заполнителем	10—30
Пески неоднородные	5—10
Супеси	2—0,1
Суглинки	< 0,1
Глины	Тысячные доли

2. Полупроницаемые — коэффициент фильтрации 1—0,001 м/сут. Это глинистые пески, супеси, лёссы, слаботрещиноватые скальные породы.

3. Практически непроницаемые (водоупорные) — коэффициент фильтрации меньше 0,001 м/сут: плотные массивнокристаллические — скальные породы, глины, нетрещиноватые мергели, аргиллиты, глины.

В глинах, являющихся практически водонепроницаемыми породами, значительная часть воды находится в связанном состоянии. Эта вода под влиянием силы тяжести не передвигается. Однако, создавая на грунт нагрузку, увеличивая напорный градиент, можно заставить передвигаться и связанную воду. Напорный градиент, при котором связанная вода в глинах начинает двигаться, называют начальным градиентом, или градиентом порога фильтрации.

Величина начального градиента зависит от состава и структуры породы и может достигать весьма больших значений (порядка десяти и более). Начальный градиент необходимо учитывать при расчете осадок сооружений. Слой породы в основании сооружений, в которых градиент оказывается меньше начального, уплотняются слабо и процесс уплотнения протекает быстро во времени.

Фильтрационные свойства пород определяются в лаборатории и полевых условиях. В лабораторных условиях для определения коэффициента фильтрации предложен ряд приборов, принцип работы которых состоит в том, что изучаемая порода помещается в прибор и через нее под разными напорными градиентами пропускается вода, расход которой учитывается, а затем по формулам производится расчет.

Для песков коэффициент фильтрации может быть ориентировочно рассчитан по эмпирическим формулам, которые отражают зависимость коэффициента фильтрации от гранулометрического состава.



Таблица 30

Максимальная молекулярная и полная влагоемкость некоторых пород различного минералогического состава (по В. Д. Ломтадзе, 1970)

Породы	Максимальная молекулярная влагоемкость, %	Полная влагоемкость, %
Монтмориллонитовая глина (бентонит)	44	71
Каолинистая глина (каолин глуховский)	22	43
Гидрослюдистая глина (кембрийская)	14	29
Тонкозернистый кварцевый песок (маршаллит)	2	25

Таблица 31

Максимальная молекулярная влагоемкость фракций разной крупности (по А. Ф. Лебедеву, 1927)

Фракции	Размер фракций, мм	Максимальная молекулярная влагоемкость, %
Песчаные:		
крупнозернистые	1—0,5	1,6
среднезернистые	0,5—0,25	1,6
мелкозернистые	0,25—0,10	2,7
тонкозернистые	0,10—0,05	9,8
Пылеватые (алевроитовые)	0,05—0,005	10,2
Глинистые	<0,005	44,2

Таблица 32

Средние значения коэффициента водоотдачи некоторых горных пород (по О. Б. Скиргелл)

Породы	Коэффициент водоотдачи, μ_v
Тонкозернистые пески и супеси	0,10—0,15
Мелкозернистые пески	0,15—0,20
Среднезернистые пески	0,20—0,25
Крупнозернистые и гравелистые пески	0,25—0,35
Песчаники на глинистом цементе	0,02—0,03
Известняки трещиноватые	0,008—0,10
Известняки сильно закарстованные	0,05—0,15

Для определения фильтрационных свойств пород в поле применяют опытные откачки из шурфов и скважин и опытные наливки (нагнетания) воды в шурфы и скважины. Определив расход откачиваемой (нагнетаемой) воды и величину понижения (повышения) ее уровня, а также другие исходные данные, рассчитывают по формулам коэффициент фильтрации.

В нефтяной геологии фильтрационные свойства пород оцениваются по величине *проницаемости*, под которой также понимается способность пористых пород пропускать жидкости или газы при наличии перепада давления. За единицу проницаемости принят 1 *дарси* — расход жидкости, равный 1 $см^3/сек$ через поперечное сечение породы 1 $см^2$ при ламинарном режиме и перепаде давления 1 *атм* на 1 *см* длины при вязкости 1 *сантипуаз*.

Коэффициенты фильтрации и проницаемости — основные расчетные показатели, используемые при решении разнообразных гидрогеологических и инженерно-геологических задач (водоснабжение, подсчет запасов подземных вод, расчет фильтрационных потерь при гидротехническом строительстве, расчет дренажных сооружений, режим водопонижения и др.).

Влагоемкость и водоотдача пород

Способность пород принимать, вмещать и удерживать определенное количество воды называется *влагоемкостью*.

По степени влагоемкости дисперсные породы разделяются на три группы: влагоемкие (глинистые породы), средне-влагоемкие (супеси, пески тонко- и мелкозернистые, пылеватые) и не-влагоемкие (пески средне- и крупнозернистые, гравий, галечники и другие крупнообломочные породы).

В зависимости от вида и количества воды, содержащейся в породе, различают несколько видов влагоемкости: *гигроскопическую* и *максимальную гигроскопическую влагоемкость*, *максимальную молекулярную* и *капиллярную влагоемкость* W_k , о которых уже говорилось выше.

Суммарное содержание в породе всех видов воды при полном заполнении всех пустот называется *полной влагоемкостью* породы ($W_{п. в}$) (табл. 30, 31).

Все виды влагоемкости выражаются обычно отношением веса воды, содержащейся в породе, к весу минеральных частиц (скелета) породы (показатель *абсолютной влажности*) или же отношением объема воды к объему пор (показатель *относительной влажности* породы — *коэффициент влажности*).

В глинистых породах, способных к набуханию (увеличению объема при увлажнении), следует различать полную влагоемкость при естественной пористости, т. е. собственно полную влагоемкость, или полную влажность, и влажность набухания — полную влагоемкость при свободном набухании породы в процессе поглощения воды.

Поглощенная породой вода частично удерживается породой, а частично свободно вытекает из нее под влиянием силы тяжести и разности напоров.

Свойство пород, насыщенных водой, отдавать ее путем свободного стекания называется *водоотдачей*.

Водоотдача зависит от типа породы, размера частиц, из которых она состоит, и характера материала, заполняющего поры и тре-

щины породы, а также от температуры воды. Наибольшей водоотдачей обладают крупнообломочные породы, наименьшей — тонкозернистые пылеватые пески. Водоотдача глинистых пород ничтожна, и практически они считаются породами, не обладающими водоотдачей.

Водоотдача горных пород характеризуется коэффициентом водоотдачи (μ_v), выражается он в долях единицы, определяется опытным путем в поле в результате наблюдений за режимом подземных вод или специальных откачек (табл. 32). Для песчаных пород ориентировочно может быть рассчитан по разности между значениями полной влагоемкости $W_{п.в}$ и максимальной молекулярной влагоемкости W_m :

$$\mu_v = W_{п.в} - W_m$$

Определение водоотдачи пород имеет важное практическое значение при расчете осушения горных выработок, строительстве дренажных сооружений, подсчете запасов подземных вод и др.

Контрольные вопросы

1. Что такое прямая и диффузная растворимость и как она влияет на инженерно-геологические свойства пород?
2. Что такое набухание, показатели набухания и как они определяются?
3. Какое инженерно-геологическое значение имеют процессы усадки глинистых горных пород и какими показателями она характеризуется?
4. Что понимают под размоканием, чем этот процесс отличается от набухания?
5. Какое влияние оказывают на фильтрационные свойства пород структура и текстура?
6. Как влияют катионы натрия и кальция на водопроницаемость?
7. Какие виды влагоемкости различают в горных породах?
8. Что такое водоотдача и каково ее практическое значение?

Литература

- Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Т. 2. Под ред. Е. М. Сергеева, С. Н. Максимова и Г. М. Березкиной. М., Изд-во МГУ, 1968, гл. 28, 30 и 31.
- Приклонский В. А. Грунтоведение. Ч. 1. М., Изд-во лит. по геологии и охране недр, 1955, гл. 19.
- Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. VI, § 1, 6, 7, 9; гл. IV, § 6.

Под коллоидными свойствами понимают особенности электрических, химических и других свойств, которыми обладают тонкодисперсные породы с большой удельной поверхностью частиц. Под удельной поверхностью понимается сумма поверхностей всех частиц, заключающихся в 1 см^3 породы.

К коллоидным относятся частицы диаметром от 0,0001 до 0,000001 мм. Частицы меньше 0,000001 мм образуют истинные растворы. Коллоидные свойства частиц от 0,0001 до 0,000001 мм являются результатом взаимодействия дисперсной части породы, т. е. тонкораздробленной ее части с окружающей средой — поровым раствором. Изучение коллоидных свойств необходимо для правильного прогноза поведения глинистых пород при возведении сооружений и разработки мероприятий по искусственному изменению свойств грунтов, когда это необходимо для обеспечения нормальной работы того или иного сооружения или наиболее экономически эффективной организации строительных работ (проходка шахт, котлованов, заложение фундаментов и т. п.).

Электрокинетические явления в глинистых породах.

Под электрокинетическими явлениями в грунтоведении понимаются явления перемещения тонкодисперсных

частиц породы в электрическом поле под влиянием разности потенциалов, возникающих на границе раздела твердой и жидкой фаз.

Если вдавить две стеклянные трубки в монолитный образец влажной, пластичной глины, не содержащей водорастворимых солей, насыпать в трубки тщательно промытый кварцевый песок, налить дистиллированную воду, опустить в трубки электроды и пропустить постоянный ток (рис. 34), то можно будет наблюдать следующую картину. В трубке с положительным электродом (анодом) вода постепенно начинает мутнеть снизу вверх. В ней появляются

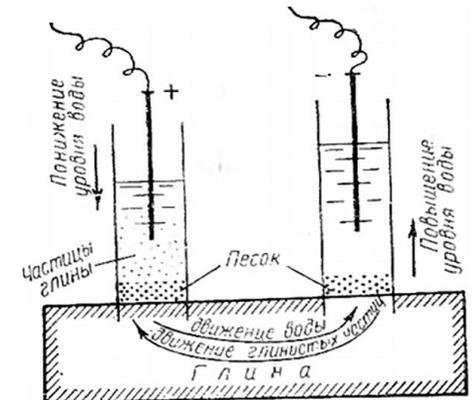


Рис. 34. Схема опыта для наблюдений явления электроосмоса и электрофореза

частички глины, проникающие через слой песка. При этом уровень воды в трубке постепенно снижается. В трубке с отрицательным электродом (катодом) вода остается прозрачной, но уровень ее постепенно повышается. Таким образом, наблюдается движение воды от анода к катоду, а глинистых частиц — от катода к аноду. Явление переноса глинистых частиц электрическим током получило название *электрофореза*, а движение жидкости под влиянием разности потенциалов — *электроосмоса*.

Если провести тот же опыт, но без стеклянных трубок с водой, т. е. вдавливать электроды непосредственно в кусок влажной глины, не содержащей водорастворимых солей, то после включения тока будет наблюдаться картина, аналогичная описанной выше: влажность глины вокруг анода будет уменьшаться, а в зоне катода — увеличиваться; у анода будет наблюдаться щелочная реакция и выделение кислорода, а у катода — выделение водорода и кислая реакция, т. е. явление электролиза.

Так как опыты проводятся с глинами, не содержащими водорастворимых солей, которые могли бы переходить в раствор и обуславливать явления электролиза, то объяснить наблюдаемые процессы можно, если предположить, что в глине под влиянием электрического тока происходит диссоциация мицеллы. Ядро мицеллы — коллоидной грунтовой частицы, имея отрицательный заряд, движется к аноду, а у катода концентрируются катионы, находящиеся в диффузном слое. Катионы передвигаются к катоду вместе с окружающими их водными оболочками, т. е. к катоду движется жидкая фаза, а к аноду — твердая.

На принципе электроосмоса основан электродренаж — осушение карьеров, строительных котлованов, траншей и других выработок, проходимых в обводненных породах со слабой водоотдачей (суглинки, супеси, тонкозернистые глинистые пески).

При электродренаже по периметру осушаемой площадки забивают электроды, через которые пропускают постоянный электрический ток. Скапливающуюся у катода воду удаляют насосами через буровые скважины, обсадные трубы, которые обычно и являются катодом.

Явления поглощения. Дисперсные породы при фильтрации через них водных растворов, как и другие пористые среды, частично задерживают вещества, содержащиеся в этих растворах. Это явление получило название *поглощения*, или *сорбции*.

Явления поглощения весьма сложны и разнообразны. Различают физическое, механическое, химическое, биологическое и физико-химическое поглощение. Среди них наибольшее инженерно-геологическое значение имеют физико-химическое поглощение, или ионный обмен, и механическое поглощение.

Физико-химическая поглотительная способность пород. Сущность физико-химического поглощения, или ионного обмена, состоит в том, что при взаимодействии дисперсных пород с водой, т. е. природным раствором, одни ионы исчезают из раствора, а другие появляются вместо них в эквивалентных количе-

ствах. Это ионы, освобождаемые с поверхности частиц, ионы диффузного слоя, окружающего твердую частицу, а также частично ионы, участвующие в строении кристаллической решетки. Например, при взаимодействии глинистой породы с раствором CaCl_2 мер, при взаимодействии глинистой породы с раствором CaCl_2 часть ионов Ca^{2+} исчезает из раствора, вместо них в растворе появляются новые, другие катионы, например Mg^{2+} или Na^+ , суммарное количество которых будет эквивалентно количеству исчезнувшего из раствора Ca^{2+} .

Явления поглощения изучены в отношении катионов. Что касается поглощения анионов, то этот процесс изучен очень слабо.

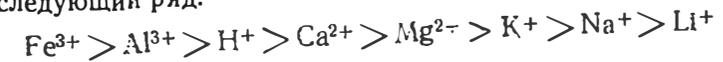
Впервые изучать обменные реакции в почвах начал академик К. К. Гедройц, который установил общие закономерности этих процессов.

Причинами поглощения ионов К. К. Гедройц считает поверхностную энергию и наличие у частиц электрического заряда. Он установил, что обменной способностью обладают только тонкодисперсные фракции ($< 0,005 \text{ м м}$), т. е. частицы, обладающие большой поверхностной энергией. Эту часть фракций Гедройц назвал *поглощающим комплексом*.

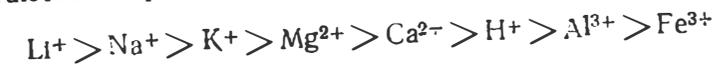
Общее количество ионов в породе, способных к обмену в данных условиях, называют *емкостью поглощения*, или *емкостью обмена* породы. Емкость поглощения выражают в миллиграмм-эквивалентах на 100 г абсолютно сухой породы. Величина емкости поглощения пород в среднем не превышает 60 мг·экв и лишь в редких случаях достигает 100 мг·экв. Наибольшей поглотительной способностью обладают высокодисперсные бентонитовые глины.

Возникает вопрос, все ли катионы одинаково активно участвуют в ионном обмене или наблюдается разная их активность. Проведенные в этом направлении исследования показали, что одни катионы вытесняют ионы более энергично, другие менее, но, будучи поглощенными, сами они вытесняются много труднее.

Наибольшей активностью характеризуются трехвалентные катионы, наименьшей — одновалентные. Исключение составляет только водород, активность которого выше активности двухвалентных катионов. Наиболее распространенные катионы по энергии поглощения (при всех прочих равных условиях) могут быть расположены в следующий ряд:



Каждый более активный катион может вытеснить из поглощенного состояния и перевести в раствор катионы более низкой активности. По энергии выхода из поглощенного состояния катионы располагаются в обратной последовательности:



Иногда наблюдаются явления избирательного поглощения и нарушение указанного ряда. Например, органическое вещество почв часто обнаруживает избирательную способность в отношении Ca^{2+} .

Фактически в глинистых породах в поглощенном состоянии встречаются лишь пять катионов: H^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} . При этом, если в поглощающем комплексе глины находится H^+ , считается, что глина ненасыщена.

По преобладающему в поглощающем комплексе катиону глинистая порода получает свое название — натриевая глина (бентонит), кальциевая глина и т. д.

В дисперсных породах и почвах наиболее часто и в значительных количествах в поглощенном состоянии встречается ион кальция, что объясняется широким распространением солей кальция в воде. Обменный магний присутствует в дисперсных породах и почвах обычно в меньшем количестве, чем кальций. Наиболее часто магний отмечается в глинистых породах, являющихся продуктом выветривания основных пород (габбро, перидотит и др.) и доломитизированных мергелей.

Из одновалентных катионов в поглощенном состоянии встречается чаще всего натрий, которым богаты поровые растворы осадочных пород морского происхождения.

Ион водорода в поглощенном состоянии обычно находится в породах континентального происхождения, отложенных пресными водами, которые вымыли из пород все соли, вплоть до малорастворимых карбонатов кальция.

Обменная способность дисперсных пород зависит от гранулометрического и минералогического состава породы. Емкость поглощения, как правило, увеличивается с ростом дисперсности.

Коллоидные частицы первичных минералов обладают весьма значительной обменной способностью по сравнению с вторичными. Среди вторичных минералов наибольшей обменной способностью характеризуются минералы с неустойчивой — подвижной кристаллической решеткой (минералы группы монтмориллонита).

Большое влияние на величину поглощения оказывает реакция среды. Установлено, что водородные ионы препятствуют поглощению катионов из раствора. Это препятствие увеличивается при уменьшении рН и уменьшается при увеличении рН раствора, т. е. при уменьшении рН среды обменная способность породы относительно других катионов уменьшается и увеличивается при увеличении рН.

Обменная способность породы может изменяться и при тепловом воздействии на нее. Установлено, что при высушивании породы при температуре более $40^\circ C$ происходит уменьшение ее обменной способности и замедление самого процесса поглощения.

Обмен ионов происходит более интенсивно при увеличении концентрации раствора, взаимодействующего с породой.

Имеются также указания на то, что при естественной структуре породы ее поглощающая способность меньше, нежели поглощающая способность порошка, приготовленного из этой же породы.

Изучение физико-химической обменной способности горных пород и почв имеет большое значение для народного хозяйства. Повышение плодородия почв, обогащение руд (флотация), очистка

нефтяных продуктов, обессоливание воды, изучение процессов выветривания горных пород, изучение инженерно-геологических свойств пород и, наконец, мелиорация пород в строительных и других целях — все эти вопросы могут быть правильно решены только при тщательном изучении физико-химической обменной способности почв и пород.

Состав обменных катионов сильно влияет на физическое состояние и инженерно-геологические свойства тонкодисперсных — глинистых пород и в том числе на их прочность хотя это влияние изучено еще недостаточно.

Следует отметить, что чем больше емкость обмена породы, тем сильнее при прочих равных условиях сказывается влияние состава обменных ионов на свойства породы. У бентонитовых глин (состоящих главным образом из монтмориллонита) это влияние выражено очень отчетливо; у каолинитовых глин оно значительно слабее.

Кроме емкости обмена на свойства пород большое влияние оказывает состав обменных катионов. Наиболее резкое и диаметрально противоположное воздействие оказывают на свойства пород поглощенный натрий и кальций.

При насыщении породы натрием уменьшаются ее водопроницаемость и сопротивление внешним механическим воздействиям (уменьшается прочность), увеличиваются пластичность, набухание и размокание. Насыщение той же породы кальцием приводит к увеличению водопроницаемости, повышению сопротивляемости внешним механическим воздействиям, увеличению водостойкости породы. Все это говорит о том, что, изучив физико-химическую поглощательную способность грунтов, можно изменять свойства пород в нужном направлении.

Механическая поглощательная способность пород. Под механической поглощательной способностью понимается свойство пористых пород не пропускать, задерживать частицы, взвешенные в воде, фильтрующейся через породу. Задержанные частицы образуют с породой более или менее прочные соединения (цементация). Примерами механического поглощения могут служить процессы заиления руслового аллювия рек и озер, сложенного песчаными или гравийно-галечниковыми породами, заиление дренажных канав и др. Заиление приводит к резкому снижению фильтрационных свойств пород, слагающих русловой аллювий и дно и борта дренажных канав.

Физическая поглощательная способность. Она связана с молекулярным притяжением между коллоидными частицами тонкодисперсных пород и веществами, находящимися в воде в виде раствора или во взвешенном состоянии (суспензии). При этом химического взаимодействия между частицами породы и поглощаемого вещества не происходит.

Процессы физического поглощения наблюдаются очень часто совместно с процессами механического поглощения например при заилении русел рек и каналов. Эти процессы могут быть использованы для искусственной кольматации бортов и дна каналов, прудов,

водохранилищ в целях уменьшения и даже прекращения фильтрационных потерь воды из них.

Коагуляция. Из коллоидной химии известна способность коллоидных частиц при определенных условиях соединяться с другими частицами и образовывать более крупные, сложно построенные частицы, или, вернее, *агрегаты частиц*. Это явление свертывания, укрупнения, частиц носит название *коагуляции*. При изменении условия некоторые из образовавшихся таким образом агрегатов могут снова распадаться на составные части. Процесс, обратный коагуляции, называется *пептизацией*, или *диспергированием*. Свернувшиеся, укрупненные, частицы в суспензии выпадают в осадок.

Свертывание, укрупнение, коллоидных частиц свидетельствует о том, что при некоторых условиях над силами отталкивания, действующими между частицами, начинают преобладать силы притяжения.

Сближению частиц препятствуют одноименные электрические заряды и гидратные оболочки. Следовательно, чтобы облегчить коагуляцию, нужно уменьшить толщину диффузных оболочек вокруг частиц. Из гл. 6 уже известно, что толщина диффузных оболочек зависит от дзета-потенциала (ζ -потенциала): чем меньше ζ -потенциал, тем тоньше диффузные оболочки. Коагуляция начинается при некотором значении ζ -потенциала, называемом критическим потенциалом. Очевидно, что самое благоприятное условие для коагуляции создается тогда, когда ζ -потенциал равен нулю.

Коагуляция происходит под влиянием различных факторов, в зависимости от которых различают несколько видов коагуляции. Главнейшими из них являются: электролитная коагуляция, взаимная коагуляция, коагуляция при замораживании и при высушивании.

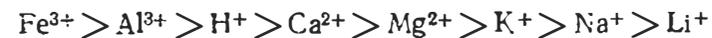
Электролитная коагуляция. Имеет очень важное практическое значение. Происходит под влиянием увеличения в растворе концентрации электролитов, которая снижает ζ -потенциал до его критического значения.

Минимальная концентрация электролита, при которой начинается коагуляция, называется *электролитическим порогом*, или *порогом коагуляции*. Чем более гидрофилен коллоид, т. е. чем больше толщина гидратных оболочек, тем выше для него порог коагуляции.

Коагулирующее действие оказывают только те ионы, которые имеют заряды, противоположные заряду частицы. Такие ионы называются *ионами-коагуляторами*. Противоположный ион, т. е. ион, имеющий одинаковый с частицей заряд и стремящийся не допустить коагуляции, носит название *иона-стабилизатора*, или *пептизатора*.

Коагулирующая способность катионов неодинакова. Наибольшей коагулирующей способностью обладают трехвалентные катионы, наименьшей — одновалентные. Исключение составляет водород, коагулирующая способность которого больше не только всех одновалентных, но даже и двухвалентных катионов. По коагулирующей

способности наиболее часто встречающиеся катионы располагаются в следующей последовательности:



Стабилизирующее действие оказывают анионы. Среди анионов особенно сильным стабилизирующим свойством обладает гидроксильный ион (OH^{-}). Его стабилизирующее действие выше, чем коагулирующая способность одновалентных катионов. Поэтому присутствие в воде щелочей едкого натрия (NaOH) или аммиака (NH_4OH) вызывает не коагулирующее, а стабилизирующее действие, гидраты же двух- и трехвалентных катионов, например $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и $\text{Ca}(\text{OH})_2$, оказывают коагулирующее действие.

Электролитная коагуляция имеет широкое распространение в природе. Наиболее характерным примером электролитной коагуляции может служить осаждение осадков, выносимых пресными речными водами в соленые воды морей и океанов. В период весеннего половодья реки пополняются внешними талыми водами, почти лишенными солей электролитов. Огромные потоки этих вод смывают, взмучивают и увлекают с собой тонкие коллоидные частицы почв и рыхлых горных пород. Пока река течет по своему руслу, эти взвешенные массы частиц не оседают и образуют с речной водой суспензию, отчего воды реки имеют желтый или бурый цвет. При впадении реки в море или океан пресная вода реки смешивается с морской водой, содержащей большое количество солей электролитов. Происходит свертывание — коагуляция коллоидов, привнесенных рекой, и их седиментация — выпадение из воды, которая при этом осветляется. Чем больше соленость морской воды, тем скорее идет такой процесс. В результате в устьях рек скапливаются огромные толщи ила, образующие дельты современных рек.

Взаимная коагуляция. В процессе выветривания и почвообразования образуются коллоидные частицы с разноименными электрическими зарядами. Положительными зарядами обычно обладают гидроокиси железа и алюминия, отрицательными — вторичные минералы, кремнекислоты и гумусовые соединения. При встрече противоположно заряженных частиц происходит их взаимное притяжение, свертывание и образование агрегатов более сложного состава и большего размера.

Взаимная коагуляция имеет широкое распространение в природе. В результате такой коагуляции образуются ортштейны, уплотненные иллювиальные горизонты почв (взаимная коагуляция гидроокисей железа и гумусовых веществ).

Коагуляция при замораживании. Укрупнение, свертывание, коллоидных частиц наблюдается при замораживании коллоидного раствора или суспензии. При замораживании происходит постепенное увеличение концентрации раствора, вызывающее коагуляцию. Кроме того, образующиеся при замерзании воды кристаллы льда как бы сдавливают коллоидные частицы, сближают их и тем самым способствуют образованию агрегатов.

Коагуляция при замораживании имеет большое практическое значение. Коагуляция почвенных частиц, происходящая при сезонном промерзании почв, ведет к образованию почвенных агрегатов. Агрегатность почв способствует сохранению влаги и обеспечивает возможность лучшей аэрации почв. Диспергированные почвы быстро испаряют влагу, на поверхности таких почв образуются корки, препятствующие аэрации.

Коагуляция при высушивании. Явления коагуляции наблюдаются и при высушивании. Однако этот процесс еще недостаточно изучен. По-видимому, коагуляция при высушивании происходит также в результате повышения концентрации ионов в растворе при высушивании.

Основная особенность коагуляции при высушивании — необратимость процесса: скоагулировавшие при высыхании частицы при последующем увлажнении не дают коллоидного раствора, т. е. не диспергируют. Процессом необратимости объясняются значительные изменения свойств большинства глинистых пород после их высыхания.

Пептизация. Как уже было сказано, пептизация — это процесс распада агрегатов, т. е. процесс размельчения — диспергирования. Наблюдается он в условиях, противоположных условиям коагуляции. Пептизацию можно вызвать искусственно — удалением из раствора соли электролитов и введением в раствор диспергирующих веществ (едкая щелочь, аммиак и др.).

Явления коагуляции и пептизации должны учитываться при производстве гранулометрического анализа для получения истинного представления о составе глинистой породы. Эти явления имеют большое практическое значение, так как по-разному влияют на инженерно-геологические свойства глинистых пород, резко изменяют состояние составляющих их тонкодисперсных частиц. Пептизация ведет к уменьшению водопроницаемости пород, коагуляция увеличивает ее. Пептизация приводит к увеличению осадки глин под действием нагрузки, увеличивает набухаемость и усадку глин.

Зная эти процессы, можно искусственно изменять свойства глинистых пород в нужном для народного хозяйства направлении. Так, для уменьшения потерь воды из ирригационных каналов, проложенных в лёссах, супесях и легких суглинках, можно искусственно вызвать пептизацию этих грунтов в откосах и бортах каналов, обработав их хлористым натрием (способ академика А. Н. Соколовского). В почвах, наоборот, стремятся поддерживать агрегатное состояние. Для этого в тяжелые диспергированные глинистые почвы вносят известь.

При производстве гранулометрического анализа засоленных глинистых пород, которые при образовании суспензий коагулируют, применяют стабилизаторы, позволяющие определить размер слагающих породу элементарных частиц, а не их агрегатов.

Тиксотропные явления в тонкодисперсных породах. *Тиксотропией* называется способность некоторых коллоидных систем при механическом воздействии (встряхивании, размешивании) разжи-

жаться и переходить из геля в золь. Это же явление можно вызвать электрическим током, вибрацией, ультразвуковыми колебаниями и т. д. Разжиженная система, постепенно «застывшая», вновь переходит в гель. Время, в течение которого происходит этот обратимый процесс, зависит от характера породы и ее состояния. Оно изменяется от нескольких секунд до суток и более. Чем меньше промежутки времени, требующийся для «застывания», тем более тиксотропна порода.

Наиболее простым и наглядным примером проявления тиксотропии является разжижение некоторых тонкозернистых глинистых песков морских и речных берегов. В состоянии покоя эти пески достаточно плотные и при передвижении по ним ноги человека оставляют на них очень слабые отпечатки. Но стоит только человеку остановиться на этих песках и произвести вибрирующие движения ногами, как пески разжижаются, выделяется свободная вода и ноги начинают погружаться в пески. После некоторого периода покоя поверхность песков приобретает прежний ровный и плотный вид. Явление тиксотропии весьма напоминает коагуляцию и пептизацию и зависит от большого числа факторов, главнейшими из которых являются: гранулометрический состав (степень дисперсности) породы, форма частиц, состав раствора (подземной воды, содержащейся в породе) и концентрация солей электролитов в породе, кислотность среды, температура, толщина гидратных оболочек вокруг частиц и др.

Наиболее отчетливо тиксотропные свойства проявляются в глинистых породах, состоящих из гидрофильных глинистых минералов группы монтмориллонита, слабее — в глинистых породах, в составе которых преобладают минералы группы каолинита. Характерно, что даже небольшое прибавление тиксотропного вещества придает всей системе тиксотропные свойства. Так, например, чистый кварцевый песок нетиксотропен, но если к нему прибавить несколько процентов глинистых частиц, состоящих из монтмориллонита, песок этот приобретает отчетливо выраженные тиксотропные свойства.

Явления тиксотропии еще в должной мере не изучены и природа их недостаточно ясна. Ряд ученых (П. А. Ребиндер, Б. В. Дерягин и др.) высказали различные общие соображения о вероятных причинах и механизме тиксотропных превращений.

Е. М. Сергеев считает, что при некоторых внешних воздействиях на породы, содержащие коллоидные частицы, какая-то часть рыхлосвязанной воды переходит в свободное состояние. В связи с этим нарушаются связи между частицами и порода разжижается. После устранения внешнего воздействия вода вновь переходит в связанное состояние и как бы закрепляет породу.

Породы, обладающие тиксотропными свойствами, относятся к истинным пльвинным в отличие от псевдопльвинных, возникающих под влиянием гидродинамического давления.

Изучение тиксотропии следует считать первоочередной задачей грунтоведения, так как инженерно-геологическое значение тиксотропных явлений очень велико. С ними мы встречаемся при забивке

свай в основания фундаментов, на которые воздействуют динамические нагрузки, при бурении скважин (образование пробок), при проходке горных выработок. Явлениями тиксотропии, по-видимому, объясняются в ряде случаев катастрофические деформации полотна железных дорог, образование оползней и т. п. Иными словами, явления тиксотропии имеют довольно широкое развитие и оказывают влияние на строительство и эксплуатацию инженерных сооружений.

Контрольные вопросы

1. Какие породы обладают коллоидными свойствами и чем обусловлены эти свойства?
2. Что такое электрофорез и электроосмос и какое они имеют практическое значение?
3. Какова сущность явления поглощения в тонкодисперсных породах?
4. От каких факторов зависит поглотительная способность пород?
5. Какова адсорбционная способность наиболее часто встречаемых катионов?
6. Какое практическое значение имеют процессы поглощения в породах?
7. Что такое коагуляция и каково ее практическое значение?
8. Что такое пептизация и каково ее практическое значение?
9. Что такое тиксотропия, в чем сущность этого явления и каково его инженерно-геологическое значение?
10. Чем отличаются псевдоплывуны от истинных плывунов?

Литература

- Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Под ред. Е. М. Сергеева, С. Н. Максимова и Г. М. Березкиной. Т. 2. М., Изд-во МГУ, 1968, гл. 32.
- Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. III, § 3, 4, гл. VI, § 3, 4, 10.

Под *электропроводностью* понимают свойство пород пропускать электрический ток. Электропроводность измеряется удельным электрическим сопротивлением (ρ_{yx}).

За величину удельного электрического сопротивления породы принимается электрическое сопротивление образца породы, имеющего форму куба с поперечным сечением 1 м² и высотой 1 м. Удельное электрическое сопротивление измеряется в омметрах (ом·м):

$$\rho_{yx} = R \frac{F}{l} \text{ ом} \cdot \text{м},$$

где R — электрическое сопротивление, ом; l — длина образца породы, м; F — площадь поперечного сечения, м².

В лабораторных условиях из-за небольших размеров образцов измерения их производятся в сантиметрах (ом·см).

Величина, обратная удельному электрическому сопротивлению, называется *проводимостью*.

Знание электропроводности горных пород необходимо для поисков геофизическими методами месторождений полезных ископаемых и прежде всего нефти, угля, подземных вод и пр. В инженерной геологии на основе изучения электрических свойств горных пород оконтуриваются участки распространения многолетнемерзлых пород, определяется глубина залегания и минерализация подземных вод, определяется глубина залегания скальных пород, отбиваются границы между литологическими разностями пород и т. д. Знание электрических свойств горных пород необходимо для проектирования защитных мероприятий в целях борьбы с коррозией подземных кабелей и трубопроводов, расчета заземляющих устройств электростанций и линий электропередач и т. д. Свойство горных пород проводить электрический ток широко используется при производстве электрокаротажа скважин для изучения геологических разрезов, выявления обводненных зон, определения направления потока грунтовых вод и скорости их движения, изучения пористости пород и др. Электрические свойства горных пород используются также для изучения процессов промерзания и оттаивания дисперсных пород.

Факторы, определяющие электропроводность пород. Величина удельного электрического сопротивления у разных минералов и горных пород колеблется в широких пределах — от многих сотен тысяч ом·м до тысячных и миллионных долей ом·м.

Наибольшим удельным сопротивлением характеризуются слюды, галоиды, силикаты, сера, флюорит и др. Эти минералы практически

являются изоляторами, т. е. телами, не проводящими электричество. Минимальные значения удельных сопротивлений присущи сульфидам, что связано с высокой проводимостью электричества, свойственной металлам (табл. 33).

Таблица 33

Удельные электрические сопротивления некоторых породообразующих минералов

Минералы	Удельное электрическое сопротивление, $ом \cdot м$	Минералы	Удельное электрическое сопротивление, $ом \cdot м$
Ангидрит . . .	10^9	Слюда . . .	$10^{11} - 2 \cdot 10^{15}$
Кальцит . . .	$5 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^{12}$	Пирит . . .	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Каменная соль	$5 \cdot 10^{14} - 10^{15}$	Магнетит . .	$3,6 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-3}$
Кварц	$1,2 \cdot 10^{12} - 3,2 \cdot 10^{14}$		
Полевые шпаты	$4 \cdot 10^{11}$		

Из горных пород наиболее высоким сопротивлением обладают магматические, некоторые галогенные и метаморфизованные разности.

Для магматических и метаморфизованных пород характерно резкое колебание сопротивления при незначительных (до 0,5%) изменениях влажности.

Осадочные породы характеризуются большим разнообразием величин удельного сопротивления. Очень высокими сопротивлениями обладают каменная соль, гипсы, загипсованные породы, ангидриты и доломиты. Сопротивление дисперсных — глинистых, песчано-глинистых и песчаных пород определяется минералогическим составом их и главным образом пористостью и влажностью. Как правило, удельное сопротивление дисперсных пород в естественных условиях (при естественной пористости и влажности) гораздо меньше сопротивления основных минералов, которыми сложены эти породы. Эта особенность связана с наличием в порах дисперсных пород воды, т. е. раствора электролита, и газов, заполняющих поры, свободные от воды. Поэтому электропроводность дисперсных горных пород в значительной степени зависит от степени влажности породы, минерализации воды, насыщающей породу, и от ее температуры.

В тонкодисперсных породах минимальная электропроводность, близкая практически к нулю, наблюдается при влажности до 6%. По мере увеличения влажности электропроводность возрастает и максимального значения достигает при влажности, равной примерно 80% от полной влагоемкости.

Электропроводность воды, насыщающей породу, зависит от характера и концентрации солей в растворе и температуры (табл. 34).

Сопротивление водных растворов понижается с повышением температуры. Это понижение объясняется увеличением подвижности ионов с повышением температуры и уменьшением вязкости этих

Удельное сопротивление водных растворов некоторых солей при температуре 18° С

Содержание солей в растворе, г/л	Удельное сопротивление раствора, $ом \cdot м$			
	NaCl	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂
0,01	516	548	455	414
0,10	52,5	55,7	47,4	43,2
1,00	5,54	5,84	5,24	4,73
10,00	0,63	0,64	0,63	0,58
100,00	0,08	0,07	0,08	0,08
200,00	0,05	0,04	0,06	0,07

растворов. На графике (рис. 35) в качестве примера показано влияние температуры на изменение электрического сопротивления раствора хлористого натрия.

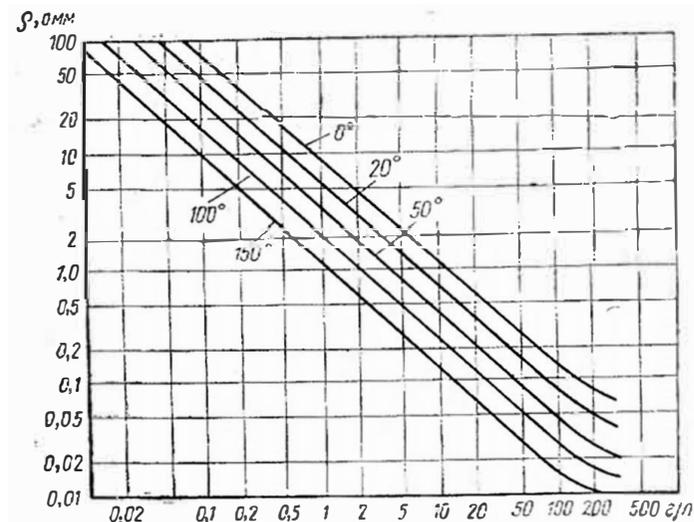


Рис. 35. График зависимости электрического сопротивления раствора хлористого натрия от его концентрации при различных температурах

Таким образом, удельное сопротивление горных пород меняется в широких пределах в зависимости от минерализации насыщающих их вод. Например, пески, насыщенные сильно минерализованной водой, обладают сопротивлением порядка нескольких десятых долей омметра, а насыщенные пресной водой — нескольких десятков и даже сотен омметров. Слабо влажные глины имеют сопротивление менее 0,5 $ом \cdot м$, а насыщенные водой — до 10 $ом \cdot м$ (табл. 35).

Удельное электрическое сопротивление некоторых осадочных горных пород, насыщенных водой

Наименование пород	Удельное сопротивление, Ом·м
Глина	0,5 — 10
Известняк	$6 \cdot 10^{-5} — 5 \cdot 10^{-5}$
Конгломерат	$2,5 \cdot 10^{-4} — 1,5 \cdot 10^{-4}$
Мергель	0,5 — 7·10
Песок, насыщенный пресной водой	$10 — 10^2$
Песок, насыщенный минерализованной водой	0,2 — 0,4
Песчаник	$3 \cdot 10^{-5} — 10^{-5}$
Суглинок	$10 — 4,5 \cdot 10^2$

В однородных, изотропных по строению, породах электропроводность в любом направлении одинакова. В слоистых породах удельное сопротивление в направлении, параллельном слоистости, меньше, чем в направлении, перпендикулярном слоистости.

Методы определения электрических свойств пород. Электрическое сопротивление в полевых условиях определяется с помощью каротажа в разрезе буровых скважин. Однако измеряемое при этом сопротивление в большинстве случаев не равно истинному удельному сопротивлению вследствие влияния на результаты измерений общего характера разреза и условий проведения каротажа. Поэтому измеряемое сопротивление получило название *кажущегося удельного электрического сопротивления*, или сокращенно КС, в отличие от которого удельное электрическое сопротивление называют *истинным сопротивлением*. Для получения значений истинного сопротивления пород по каротажу скважин разработан ряд методов — по диаграмме КС, по боковому каротажному зондированию (БКЗ) и др., подробно рассматриваемых в курсах промысловой геофизики.

В практике лабораторных работ наибольшее распространение получили четырехэлектродный и двухэлектродный методы определения удельного электрического сопротивления пород.

При прохождении через образец изучаемой породы электрического тока I падение напряжения ΔU между двумя эквипотенциальными плоскостями, расположенными в средней части образца, пропорционально удельному сопротивлению образца:

$$\rho_{уд} = K \cdot \frac{\Delta U}{I} \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

где K — коэффициент, зависящий от формы и размеров образца: для цилиндра (керна) $K = \frac{\pi d^2}{4l}$, для параллелепипеда $K = \frac{ab}{l}$; l — расстояние между центрами электродов M и N , м; d — диаметр керна, м; I — сила тока, а; a и b — размеры стороны торцевой поверхности образца, имеющего форму параллелепипеда.

Существует ряд четырехэлектродных схем, отличающихся друг от друга по форме и расположению электродов применительно к форме образца. На рис. 36 показана схема для образца цилиндрической формы. Электрический ток пропускается через образец с по-

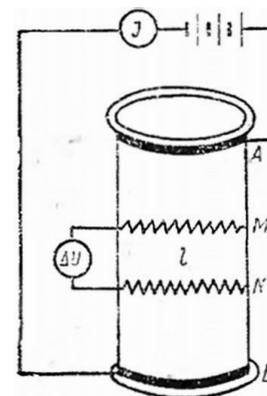


Рис. 36. Схема четырехэлектродного метода определения удельного электрического сопротивления:

A, B — питающие электроды; N, M — приемные электроды; l — расстояние между центрами электродов N и M ; I — сила тока; ΔU — разность потенциалов

мощью питающих электродов A и B , расположенных на торцах керна. Разность потенциалов ΔU снимается с приемных электродов N и M , симметрично расположенных в средней части образца и плотно его охватывающих, с помощью потенциометра со стрелочным гальванометром или электрометром (при больших сопротивлениях).

Контрольные вопросы

1. Что такое электропроводность пород и как она определяется?
2. Для каких целей определяется электропроводность?

Литература

Дортман Н. Б. и Озерский М. Л. Методическое руководство по определению физических свойств горных пород и полезных ископаемых. М., Науч.-техн. изд-во лит. по геологии и охране недр, 1962, гл. IV.

Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зянгаров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. IV, § 3.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД

Физическое состояние и свойства горных пород определяются наряду с другими факторами также температурой и тепловым режимом. Как известно, замерзая, горные породы, содержащие воду, по существу коренным образом меняют свои свойства. В ряде случаев они превращаются из слабых, не способных выдерживать какие-либо нагрузки, в весьма прочные породы и сохраняют эту прочность до тех пор, пока находятся в мерзлом состоянии. При оттаивании такая порода теряет приобретенную в процессе замерзания прочность.

С изменением температуры породы изменяется ее способность поглощать влагу. А от степени влажности породы, как уже известно, зависят многие свойства пород, особенно глинистых. Поэтому исследование тепловых процессов в породах имеет большое практическое значение. Но для того чтобы изучать тепловые процессы в породах, необходимо знать их теплофизические свойства.

Под теплофизическими свойствами горных пород понимают способность их поглощать тепло и проводить его.

Изучение теплофизических свойств пород необходимо при проектировании и строительстве различных сооружений в районах распространения многолетнемерзлых пород, при строительстве подземных сооружений глубокого заложения, при изучении руд и минералов с целью выяснения генезиса их, различных научно-исследовательских работах, например при изучении теплового режима земной коры, при термокаротажных исследованиях и др.

Основными показателями, определяющими теплофизические свойства пород, являются *удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и коэффициент температуропроводности*.

Под удельной теплоемкостью пород ($C_{уд}$) понимают количество тепла в калориях, необходимое для нагрева данной породы на 1°C .

Удельная теплоемкость выражается в $\text{ккал}/(\text{кг}\cdot\text{град})$. По величине теплоемкости большинство горных пород слабо различаются между собой. Удельная теплоемкость таких пород, как песок, глинистый сланец, песчаник, известняк, гранит, диабаз и габбро, изменяется в пределах $0,15\text{—}0,24 \text{ ккал}/(\text{кг}\cdot\text{град})$. Поэтому теплоемкость изучается сравнительно редко. Определяется она в лабораторных условиях путем сравнения темпа охлаждения изучаемой породы, заключенной в металлический тонкостенный цилиндр, с темпом охлаждения эталонного цилиндра.

Под теплопроводностью пород понимают свойство их передавать тепло (кинетическую энергию молекул).

Теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности (λ_T). Он доказывает количество тепла в калориях, проходящее в 1 ч через призму породы сечением 1 м^2 и высотой 1 м при разности температур 1°C . Он выражается в $\text{ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$. В практике часто пользуются величиной, обратной коэффициенту теплопроводности, — *удельным тепловым сопротивлением породы* $\xi = \frac{1}{\lambda_T}$.

Этот показатель характеризует степень сопротивления пород передаче тепла.

Большинство горных пород характеризуется небольшим коэффициентом теплопроводности. Наибольшей теплопроводностью обладают металлы (медь — 330 , железо — $50 \text{ ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$); у магматических пород она изменяется от $1,73$ (габбро) до $3,1$ (гранит), у осадочных пород — от $0,30$ (пески) до 3 и более (каменная соль).

Теплопроводность породы определяется ее состоянием, соотношением трех основных составляющих: минеральных частиц, воды и воздуха. Сухие породы с высокой пористостью слабо проводят тепло и тем слабее, чем выше их пористость. Если теплопроводность абсолютно плотной породы, не имеющей пор, принять за 100% , то при пористости этой же породы, равной 20% , теплопроводность ее уменьшится до 23% от начальной; при повышении пористости до 60% теплопроводность снизится до $7,8\%$.

Увлажнение сухих пород повышает теплопроводность. Так, коэффициент теплопроводности сухих песков равен $0,30$, а при влажности тех же песков, равной $20\text{—}25\%$, коэффициент теплопроводности увеличивается до $1,90\text{—}2,95 \text{ ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$.

Коэффициент теплопроводности пород определяется в лабораторных условиях по темпу охлаждения их или по данным термокаротажа скважин.

Под коэффициентом температуропроводности (a_t) понимают изменение температуры в единице объема породы за единицу времени при нестационарных тепловых процессах. Таким образом, коэффициент температуропроводности характеризует скорость распространения изменений температуры по пласту породы. Численно этот коэффициент, имеющий размерность $\text{м}^2/\text{ч}$, равен отношению коэффициента теплопроводности к произведению удельной теплоемкости на плотность породы при постоянном давлении. Его значения изменяются в пределах $0,5\text{—}6 \text{ м}^2/\text{ч}\cdot 10^3$. Коэффициент температуропроводности пород изучен слабо.

Теплофизические свойства горных пород могут быть определены в необсаженных буровых скважинах путем проведения термокаротажа. Коэффициент температуропроводности может быть определен также непосредственно в обнажениях горных пород на поверхности Земли и в горных выработках путем изучения суточного хода температур, изменяющихся под влиянием солнечной радиации, на разных глубинах (табл. 36).

Таблица 36

Теплофизические свойства некоторых минералов, горных пород и воздуха
(по В. Н. Дакцову и Д. И. Дьяконову)

Минералы и горные породы	Коэффициент теплопроводности λ , ккал/(м·ч·°С)	Удельная теплоемкость C , ккал/(кг·град)	Коэффициент температуропроводности a , м ² /ч·10 ⁹
Вода	0,503	0,998	0,505
Воздух	0,02	0,248	—
Асбест	0,19	0,195	0,46
Графит	160,0	0,15	—
Кварц	2,15	0,165	4,9
Слюда	0,31	—	—
Глина	0,86	—	—
Глинистый сланец	1,33—1,88	0,184	3,5
Песок сухой	0,34	0,191	—
Песок при влажности 20—25%	2,95	—	—
Песчаник плотный	1,1—2,6	0,20	5,0
Известняк	0,7—1,88	0,16—0,24	1,8—4,33
Мрамор	2,6—3,2	0,189	5,5
Гранит	2,09—3,1	0,155—0,190	2,2—2,7
Диорит	1,85—2,1	0,169	4,4
Диабаз	1,91	0,167	3,9
Габбро	1,73	0,172	2,8—4,8

Контрольные вопросы

1. Что понимается под теплофизическими свойствами пород и какими показателями они характеризуются?
2. Какими факторами определяется теплопроводность горных пород?
3. Способы определения теплофизических свойств пород.

Литература

Методическое руководство по определению физических свойств горных пород и полезных ископаемых. Под ред. Н. Б. Дортман и М. М. Озерской. М., Изд-во науч.-техн. лит. по геологии и охране недр, 1962, гл. VI.
Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Под ред. Е. М. Сергеева, С. Н. Максимова и Г. М. Березкиной. Т. 2. М., Изд-во МГУ, 1968, гл. 25.
Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение, М., Изд-во МГУ, 1973, гл. IV, § 2.

ГЛАВА 13

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД С ЖЕСТКИМИ СВЯЗЯМИ МЕЖДУ ЗЕРНАМИ (ТВЕРДЫХ — СКАЛЬНЫХ)

Под механическими свойствами следует понимать способность горных пород сопротивляться внешним механическим воздействиям. Последние вызывают деформации в горных породах. При достаточно больших значениях внешних механических воздействий (нагрузок) породы могут терять прочность и разрушаться. Иными словами, механические свойства горных пород характеризуют их деформируемость и прочность под действием внешних нагрузок.

Механические свойства зависят от характера породы. Различают три группы пород: породы с жесткими связями — твердые (скальные и полускальные), связные — глинистые и несвязные — песчаные. Механические свойства этих основных групп пород различны, поэтому и рассматриваются они отдельно. В данной главе анализируются механические свойства твердых — скальных и полускальных пород.

Деформационные свойства пород с жесткими связями. Свойство горных пород менять под нагрузкой форму сложения и объем называется *деформацией*. Характер деформаций, возникающих в породах, зависит от характера передаваемого усилия, его размеров, способов передачи на породу и типа породы. При сжатии образца горной породы длина его уменьшается, а поперечное сечение увеличивается; при растяжении длина увеличивается, а поперечное сечение уменьшается.

Внешние усилия, передаваемые на породу, вызывают противодействующие этим усилиям внутренние напряжения в породе. Под напряжением понимается интенсивность усилия на единицу площади. Изучением напряжений, возникающих в горных породах под влиянием нагрузок от сооружений, занимается механика грунтов. При этом напряжения рассматриваются как силы, характеризующиеся величиной и направлением, т. е. как векторные величины.

В условиях равновесия внутренние напряжения в породе равны действию внешних усилий, поэтому напряжения могут быть выражены через величину этих усилий:

$$\sigma = \frac{dP}{dF}.$$

Каждую силу, действующую на любую произвольно выбранную площадку или сечение внутри породы, можно разложить на силы, нормальную к площадке и касательную к ней (рис. 37). Эти две

силы, отнесенные к единице площади, называют соответственно *нормальным*, или *сжимающим*, и *касательным*, или *сдвигающим*, напряжением.

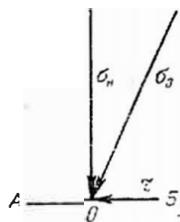


Рис. 37. Схема распределения напряжений в данной точке O элементарной площадки AB в любом сечении породы:

σ_0 — общее напряжение; σ_n — нормальное напряжение; τ — касательное напряжение

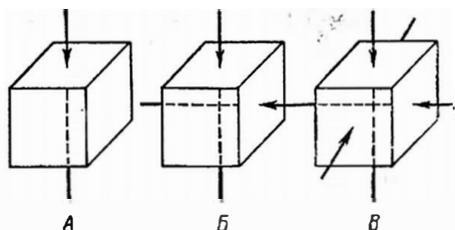


Рис. 38. Схемы напряженного состояния породы:
 A — одноосное; B — двухосное; V — трехосное

Сила, действующая перпендикулярно к данному сечению, стремится уменьшить расстояние между двумя параллельными площадками. Это уменьшение расстояния между двумя параллельными площадками под действием нормальной силы называется *деформацией сжатия*, или *сжатием*. Сила, действующая в плоскости площадок, стремится переместить эти площадки друг относительно друга. Взаимное перемещение двух смежных площадок породы в направлении, параллельном этим площадкам, под действием тангенциального усилия называется *деформацией сдвига*, или *сдвигом*.

Для определения напряжений в породах по результатам экспериментов строят «круг напряжений», или «круг Мора», о чем будет кратко сказано ниже.

В каждой точке нагруженной породы можно выделить элементарный кубик ее, на взаимно перпендикулярные грани которого действуют нормальные напряжения. Эти нормальные напряжения называют *главными напряжениями* ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). В общем случае все эти напряжения могут быть различными по величине. Различают следующие напряженные состояния пород.

1. *Одноосное напряженное состояние*, или одноосное сжатие, когда действует только одно главное напряжение, а два других равны нулю (рис. 38, A).

2. *Двухосное напряженное состояние* (рис. 38, B), когда в одной плоскости действуют два нормальных напряжения.

3. *Трехосное, или объемное (всестороннее), напряжение* (рис. 38, V), когда на породу действуют три главных напряжения. Такое напряженное состояние наиболее характерно для горных пород в естественных условиях залегания и при работе под сооружениями.

Деформации горных пород возникают тогда, когда внешние силы, действующие на породу, становятся больше внутренних сил в породе (трение и сцепление), стремящихся сохранить целостность

породы — форму и размер составляющих ее зерен и связи между ними. Они возникают в наиболее неблагоприятных сечениях. Таки неблагоприятными являются сечения, в которых действуют максимальные нормальное и касательное напряжения.

Если внутренние силы породы равны напряжениям, вызванным внешними усилиями, то порода находится в *предельном напряженном состоянии*, предшествующем ее деформации и разрушению.

Характер деформаций твердых — скальных пород в силу жестких связей между зернами сходен по механическим свойствам с деформациями обычных твердых тел. Последние, как известно, подчиняются закону Гука, закону пропорциональности между действующей нагрузкой и деформацией:

$$\sigma = Ee \text{ кг/см}^2,$$

где σ — напряжение, передаваемое на тело; e — относительная деформация тела; E — модуль упругости.

Модуль упругости равен напряжению в килограммах на квадратный сантиметр, вызвавшему относительную деформацию, равную единице. Модуль упругости — основная характеристика деформационных свойств всех твердых тел, у которых деформации носят упругий характер. Под *упругими деформациями* понимают обратимые деформации, т. е. такие деформации, которые исчезают после снятия нагрузки, вызвавшей их.

В горных породах строго упругих деформаций не наблюдается. Для них характерны еще и так называемые *остаточные* — *пластические деформации*, поэтому деформационные свойства горных пород кроме *модуля упругости (модуль Юнга)* E и *коэффициента Пуассона* μ характеризуются *коэффициентом бокового давления* и *модулем общей деформации* E_0 .

Возьмем образец скальной породы высотой l_1 и передадим на этот образец сжимающее усилие $\sigma \text{ кг/см}^2$ (рис. 39). В результате сжатия высота образца уменьшается до l_2 , а поперечные размеры увеличатся с d_1 до d_2 . Разность $l_1 - l_2 = \Delta l$ называют *абсолютной продольной деформацией* (в рассматриваемом случае укорочение).

Аналогичным образом определяется абсолютная поперечная деформация: $d_1 - d_2 = \Delta d$.

Отношения $\frac{\Delta l}{l_1} = e$ и $\frac{\Delta d}{d_1} = e'$ называются соответственно *относительными продольной и поперечной деформациями*.

При растяжении образца продольные размеры его увеличиваются, а поперечные уменьшаются.

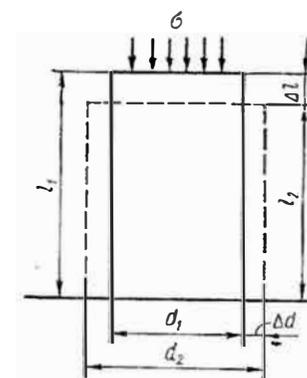


Рис. 39. Схема деформаций горной породы при одноосном сжатии

Отношение относительной поперечной деформации к относительной продольной деформации образца при сжатии или растяжении называют *коэффициентом Пуассона*:

$$\frac{\epsilon'}{\epsilon} = \nu.$$

Таким образом, коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации) представляет собой коэффициент пропорциональности между относительными и поперечными деформациями (расширение) и относительными продольными деформациями (сжатие). В твердых породах он изменяется от 0,1 до 0,4. Чем больше значение коэффициента Пуассона, тем больше порода может деформироваться. Следовательно, коэффициент Пуассона является показателем податливости породы к деформациям (табл. 37)

Таблица 37

Значения характеристик упругих свойств скальных и полускальных горных пород (по Ломтадзе В. Д.)

Название породы	Модуль упругости, 10^4 кг/см^2	Коэффициент Пуассона
Гранит	30—68	0,15—0,30
Снегит	50—88	0,14—0,26
Габбро	60—125	0,11—0,38
Диабаз	80—110	0,26—0,38
Базальт	20—100	0,20—0,23
Мрамор	35—97	0,15—0,27
Кварцит	50—85	0,13—0,26
Гранитоиднейс	17—50	0,20—0,32
Доломит	30—80	0,25—0,27
Известняк плотный	25—75	0,25—0,33
Известняк слабый	7—15	0,30—0,35
Мергель	15—46	0,30—0,40
Песчаник плотный	30—72	0,15—0,25
Песчаник слабый	6—20	0,22—0,30

При передаче на породу вертикальной нагрузки значительная часть ее вызывает деформации в породе, а остальная часть передается через породу в стороны, вызывая так называемое *боковое давление*. Численно эта часть нагрузки, или боковое давление P_6 , равна вертикальной нагрузке P , умноженной на *коэффициент бокового давления* ξ :

$$P_6 = \xi P,$$

так как коэффициент бокового давления показывает, какая часть вертикальной нагрузки передается через породу в стороны.

Величина коэффициента бокового давления у пород с жесткими связями изменяется от 0—0,1 у крепких скальных пород до 0,2—0,3 у полускальных пород.

При снятии нагрузки образец может частично или полностью восстановить свою первоначальную форму и размеры. Свойство деформированных тел восстанавливать свою первоначальную форму после снятия нагрузки называется *упругостью*.

Если деформация после снятия нагрузки компенсируется и образец восстанавливает полностью свою первоначальную форму, порода считается *абсолютно упругой*. При значительных нагрузках развиваются такие деформации, которые при снятии нагрузки исчезают лишь частично. Часть исчезнувших деформаций называется *упругой*, а сохранившихся — *остаточной*.

Упругие деформации пород с жесткими связями обусловлены упругими свойствами слагающих их минералов, характером структурных связей и цемента, а также характером трещиноватости и типом заполнителя трещин.

Остаточные — необратимые или пластические деформации весьма сложны и связаны со сдвиговыми деформациями кристаллических зерен, явлениями перегруппировки зерен и дроблением их, а также с нарушением структурных связей, т. е. деформации сопровождаются изменениями внутреннего строения породы. Остаточные деформации, кроме того, связаны с закрытием пор и трещин и выдавливанием из них неустойчивого заполнителя, выдавливанием слабых прослоек.

Важным показателем деформационных свойств пород, как уже говорилось, является *модуль общей деформации* E_0 . Он аналогичен модулю упругости с той лишь разницей, что модуль упругости является коэффициентом пропорциональности между напряжениями и упругими деформациями, а модуль общей деформации характеризует общие деформации породы под нагрузкой, как упругие, так и остаточные (табл. 38).

Таблица 38

Модуль общей деформации различных пород по данным полевых определений

Название породы	Район определения	Модуль общей деформации, кг/см^2
Граниты слаботрещиноватые	Красноярская ГЭС	16
Граниты сильнотрещиноватые	То же	4,5
Граниты	Кабрил, Канисада (Португалия)	1—20
Габбро	Украина	125
Диабазы	Братская ГЭС	13—44
Диабазы зоны выветривания	То же	1,1
Гнейсы	Арджень-Корбень (Румыния)	0,52—27
Песчаники ордовика	Братская ГЭС	15—26
Известняки верхнемеловые	Чиркейская ГЭС	80—90
Порфириды девонские	Талоресская ГЭС	35—59
Глины мергелистые пермские	Горьковская ГЭС	0,1—0,15

В скальных породах развиты главным образом деформации упругие — обратимые. Они проявляются быстро. Остаточные деформации в нетронутых выветриванием и нетрещиноватых скальных породах практически исключены. Предел упругости в таких породах имеет довольно высокое значение. При превышении этого предела порода хрупко разрушается.

Мягкие — связные породы характеризуются в основном остаточными — пластическими деформациями; упругие деформации в них имеют подчиненное значение.

Полускальные породы (мел, мергели, алевролиты, аргиллиты и др.) занимают промежуточное положение между скальными и связными — мягкими породами. В них наряду с упругими деформациями имеют место остаточные деформации. Преобладание того или иного типа деформаций зависит от характера породы, степени ее литификации, характера цемента и других факторов. В наиболее окаменевших разностях пород преобладают упругие деформации, в менее твердых породах (с преобладанием глинистого состава) — пластические.

Исследования С. А. Роза и П. Д. Евдокимова показали, что в породах с жесткими связями (скальных и полускальных) модуль упругости больше, чем модуль общей деформации. Эти показатели деформативных свойств пород закономерно изменяются в зависимости от величины нагрузки. Для получения более достоверных данных определение их должно производиться под нагрузками, равными расчетным нагрузкам от проектируемого сооружения.

Показатели упругости пород зависят от скорости приложения нагрузки, поэтому следует различить модули упругости и коэффициент Пуассона для породы при статическом и динамическом приложениях нагрузки. У абсолютно упругих тел статические и динамические модули упругости одинаковы.

Различают статические и динамические методы определения показателей упругости пород. Из статических методов наибольшее распространение в лабораторных условиях получил метод определения показателей упругости с помощью индикаторов часового типа — мессур. По этой методике изучаемый образец помещается под пресс, с помощью которого на образец передается сжимающая вертикальная нагрузка. Поперечные и продольные деформации измеряются мессурами, закрепляемыми на специальных кольцах. Показатели упругости рассчитываются по формулам.

Деформируемость скальных пород под статической нагрузкой может быть разделена на *упругую сжимаемость*, показателем которой является модуль упругости, и *уплотнение*, происходящее при небольших нагрузках в основном за счет смыкания трещин. Показателем уплотнения является модуль остаточной деформации. При полевых опытах на сжатие при нагрузке определяется модуль общей деформации, а при разгрузке из значения модуля общей деформации могут быть выделены модуль упругости и модуль остаточной деформации.

Суть динамических методов определения показателей упругих

свойств скальных пород заключается в том, что в образце изучаемой породы с помощью различных излучателей упругих колебаний возбуждаются волновые колебания. Возникающие при этом продольные и поперечные волны измеряются приемными устройствами. Зная скорость распространения продольных и поперечных волн, по специальным формулам рассчитывают модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ .

Значения модуля упругости, определенного статическим методом, как правило, несколько меньше значений модуля упругости, определенного динамическим методом. Например, при $E_{дин} < 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/см}^2$ $E_{стат} = 0,14 E_{дин} + 0,4 E_{дин}$.

С физической точки зрения, статические и динамические определения показателей упругости — это различные стадии одного и того же процесса деформации породы при меняющихся по величине и длительности действия напряжениях.

Величины динамического модуля и модуля общей деформации связаны для данной породы уравнением

$$E_0 = K(E_1),$$

где K — коэффициент связи, определяемый экспериментально для каждой породы отдельно.

Модуль общей деформации, используемый для расчета устойчивости инженерных сооружений, определяют иногда по данным лабораторных определений на образцах. Эти данные дают завышенные значения модуля деформации. В массиве породы он во много раз меньше из-за наличия трещин, которые способствуют повышенным деформациям, поэтому в практике модуль общей деформации вычисляют по данным статических опытов в полевых условиях (нагрузки на штамп). Однако получаемые при таких опытах результаты характеризуют небольшую ограниченную зону. Большие площади оснований крупных сооружений требуют знания деформационных свойств большого массива породы. Для получения такой информации весьма перспективным является комплексное использование данных статических и сейсмоакустических методов исследований (см. стр. 180).

Механическая прочность пород с жесткими связями между зернами. Способность пород с жесткими связями сопротивляться разрушению от действия внутренних напряжений, возникающих под воздействием внешних усилий, называется *механической прочностью*.

Твердые породы с жесткими связями между зернами наиболее прочные. Высокая начальная прочность их в основном обусловлена силами сцепления между слагающими их отдельными минералами и агрегатами минералов. Эти силы в магматических породах возникают в процессе раскристаллизации магматических масс, в метаморфических — в процессе уплотнения и разогрева исходных пород и, наконец, в осадочных твердых породах — в результате процессов уплотнения, цементации и последующей кристаллизации цементирующего вещества.

Примерные значения временного сопротивления сжатию некоторых пород в невыветрелом состоянии

Породы	Временное сопротивление сжатию, кг/см ²	Породы	Временное сопротивление сжатию, кг/см ²
Граниты . . .	1200—2400	Песчаники . . .	100—1800
Порфиры . . .	1300—2300	Известняк-ракушечник . . .	4—30
Базальты . . .	1000—4600	Известняки . . .	400—1900
Трахиты . . .	600—1600	Артинский туф . . .	40—200
Мраморы . . .	800—1200		

Деформации в таких породах связаны с разрушением кристаллов минералов и разрывом структурных связей. В трещиноватых, выветрелых породах деформации происходят по ослабленным зонам — трещинам, плоскостям расслоения, пустотам и др.

Различают механическую прочность на сжатие ($R_{сж}$), на растяжение (R_p), на сдвиг (скальвание $R_{ск}$) и на изгиб ($R_{изг}$).

Прочность на сжатие характеризуется *временным сопротивлением породы на сжатие* или *пределом прочности на сжатие*. Это сопротивление представляет собой предельную нагрузку, отнесенную к единице площади поперечного сечения образца, при которой образец разрушается. Временное сопротивление породы сжатию $R_{сж}$ выражают в кг/см².

Для определения временного сопротивления породы на сжатие из нее выпиливают или выбурируют образцы правильной формы в виде куба или цилиндра (керн). Верхнюю и нижнюю поверхности образца тщательно шлифуют и помещают под плиту и поршень пресса, создающего необходимое разрушающее усилие $P_{разр}$. Зная площадь поперечного сечения образца, рассчитывают временное сопротивление:

$$R_{сж} = \frac{P_{разр}}{F} \text{ кг/см}^2.$$

Прочность породы на сжатие зависит от ее минералогического состава, текстуры, структуры, характера связи между зернами и степени выветрелости. Наибольшей прочностью характеризуются невыветрелые скрытокристаллические и мелко- и равномернозернистые кристаллические породы с небольшой пористостью: базальты, диабазы, кварциты. Мономинеральные породы, как правило, при прочих равных условиях прочнее полиминеральных пород.

Прочность осадочных цементированных пород зависит от рода цемента. Как правило, она значительно ниже, чем прочность кристаллических пород. Наибольшей прочностью отличаются породы с кварцевым цементом, наименьшей — с глинистым.

Прочность пород со слоистой текстурой различна в направлениях, перпендикулярном и параллельном плоскостям напластования. Такие породы называются анизотропными в отношении сопротивления сжатию. Прочность цементированных анизотропных пород колеблется в значительных пределах: от тысяч до десятков кг/см².

Трещины и пустоты сильно снижают прочность пород. Сильно снижают прочность пород процессы выветривания. Например, прочность свежих, невыветрелых гранитов превышает 1200—1500 кг/см², а у выветрелых гранитов она снижается до 50—40 кг/см² и менее (табл. 39).

Так как нагрузки, передаваемые на основание сооружениями, обычно не превышают 10—15 кг/см², то по прочности на сжатие большинство типов пород с жесткими связями между зернами обеспечивает устойчивость всех сооружений. Исключение составляют сильно выветрелые разности, а также некоторые породы с пониженной прочностью (известняки-ракушечники, сильно пористые песчаники с глинистым цементом, некоторые мергели и др.).

Прочность некоторых осадочных пород с жесткими связями уменьшается при насыщении водой. К таким породам относятся мергели, аргиллиты, песчаники с глинистым цементом и др. Поэтому в практике одновременно с определением временного сопротивления на сжатие сухой породы определяют временное сопротивление на сжатие в водонасыщенном состоянии.

Отношение временного сопротивления сжатия водонасыщенной породы к временному сопротивлению сжатия сухой породы называется *коэффициентом размягчаемости*. Породы, у которых этот коэффициент меньше 0,75, считаются *размягчаемыми*. Чем ниже коэффициент размягчаемости, тем больше снижается прочность породы при насыщении водой. Для магматических пород коэффициент размягчаемости практически равен единице. У осадочных пород коэффициент размягчаемости определяется водостойкостью цемента.

При изучении скальных пород как облицовочного материала кроме коэффициента размягчаемости очень часто определяют *морозостойчивость*. Для этого выясняют временное сопротивление сжатию до и после замораживания. Изучаемые образцы обычно подвергают 25-кратному замораживанию и оттаиванию, а затем испытывают на сжатие. Морозостойкой считается такая порода, образцы которой в результате 25-кратного замораживания и оттаивания не приобретают видимых признаков разрушения и прочность которых на раздавливание после этого понижается по сравнению с первоначальной не более чем на 25%.

Прочность пород на сдвиг (скальвание), растяжение (разрыв) и изгиб значительно меньше прочности на сжатие:

$$R_{сж} > R_{ск} > R_p > R_{изг}.$$

По имеющимся данным можно считать, что прочность на сдвиг составляет 6—8%, растяжение — 3—5% и изгиб — 7—15% от прочности на сжатие (табл. 40).

Таблица 40

Прочность некоторых типов пород на сдвиг (скалывание),
растяжение и изгиб

Название породы	Сопротивление, кг/см^2		
	сдвигу	растяжению	изгибу
Гранит	600—800	40—55	100—240
Кварцит	400—1600	40—65	130—220
Гнейс	400—1600	40—50	60—120
Мрамор	180—1300	50	70—200
Известняк крепкий	100—1300	50	50—200
Песчаник крепкий	200—750	20—60	15—215

На результаты определения показателей прочности пород оказывают большое влияние неоднородность минералогического состава, степень раскristализации, размер и форма зерен, характер цемента, слоистость и другие текстурные особенности, наличие видимых и невидимых трещин, характер заполнителя трещин. Вместе с тем прочность образцов горных пород в значительной степени зависит от условий и техники проведения испытаний: формы и размера образцов, соотношения между размерами образца, совершенства обработки поверхности образца, скорости приложения нагрузки, характера нагрузки (статическая, динамическая, вибрационная) и т. д.

Прочность горных пород при двухосном сжатии значительно больше, чем прочность при одноосном сжатии. При всестороннем сжатии прочность возрастает еще больше. Плотные горные породы в условиях всестороннего сжатия не разрушаются даже при весьма больших давлениях, измеряемых многими сотнями кг/см^2 . При этом деформации носят упругий характер. Остаточные деформации имеют место только в неплотных пористых породах.

Твердость пород с жесткими связями. Способность пород оказывать сопротивление проникновению в нее другого, более твердого тела называется *твердостью*. Как известно, твердость минералов определяется по шкале Мооса. Минералы в этой шкале подобраны в такой последовательности, что каждый последующий минерал оставляет царапину-черту на предыдущем по шкале минералу (табл. 41).

Для установления степени твердости на гладкой поверхности испытуемой породы пробуют провести черту каждым из минералов шкалы Мооса, начиная с самого первого. Если на породе остается след, например, от кварца, но сама она чертит ортоклаз, то твердость ее принимается равной 6,5. Однако этот способ не может дать правильного представления о твердости пород, так как они являются в большинстве случаев телами неоднородными, состоящими из нескольких минералов разной твердости.

В строительном деле для оценки твердости пород применяется испытание на изнашиваемость, т. е. *сопротивление истирающим усилиям*. Эту величину определяют в специальных вращающихся барабанах и на истирающих кругах с помощью абразивных порошков.

Таблица 41

Шкала твердости минералов по Моосу

Название минералов	Сравнение твердостью известных тел	Твердость по шкале Мооса	Название минералов	Сравнение твердостью известных тел	Твердость по шкале Мооса
Тальк	Легко чертится ногтем	1	Ортоклаз	Царапает стекло и слегка чертится стальным ножом	6
Гипс	С трудом чертится ногтем	2	Кварц	Легко чертит стекло и стальной нож	7
Кальцит	Легко чертится стеклом	3	Топаз		8
Плавиковый шпат	Чертится стеклом	4	Корунд		9
Апатит	Не царапается стеклом и не чертит его	5	Алмаз		10

Изнашиваемость равна потере в весе при истирании в определенных условиях или количеству работы, необходимой для истирания 1 см^3 породы.

Испытание на изнашиваемость выполняется при инженерно-геологических исследованиях довольно редко и главным образом при проектировании дорожного строительства, когда те или иные породы используются в качестве дорожных покрытий, каменных тротуаров, полов, лестничных ступеней и пр.

Крепость пород с жесткими связями. Общее сопротивление пород воздействию внешних сил называют *крепостью*. Мерилем крепости служит сопротивление, оказываемое породой при проходке горных выработок.

М. М. Протодяконовым предложена классификация пород по крепости (табл. 42). Классификация основана на суммарной сопротивляемости пород проходке или разработке. Сопротивляемость пород воздействию внешних сил выражается особым показателем — *коэффициентом крепости* ($f_{кр}$).

По М. М. Протодяконову, сопротивляемость горной породы механическим воздействиям сопоставима с ее сопротивлением сжатию. Он принял за единицу коэффициента крепости временное сопротивление раздавливанию кубика горной породы, равное 100 кг/см^2 .

Между коэффициентом сжатия и коэффициентом крепости М. М. Протодяконовым была установлена следующая зависимость:

$$f_{кр} = \frac{R_{сж}}{100}$$

Некоторыми исследователями (Л. И. Барон) эта связь дается в более сложном виде:

$$f_{кр} = \frac{R_{сж}}{300} + \sqrt{\frac{R_{сж}}{300}}$$

По коэффициенту крепости все породы, включая связные и рыхлые — сыпучие, разделяются на 15 категорий.

Определение крепости производится при проектировании разработок пород в горных выработках, разработки месторождений полезных ископаемых и при проектировании строительства подземных сооружений — туннелей метрополитенов, гидротехнических туннелей и др. (табл. 42).

Таблица 42

Классификация горных пород по коэффициенту крепости (по М. М. Протодиякову)

Категория пород	Характер пород	Название пород	Коэффициент крепости
I	В высшей степени крепкие	Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты и базальты; исключительные по крепости другие породы	20
II	Очень крепкие	Очень крепкие граниты, кварцевый порфир, кремнистый сланец; менее крепкие, нежели указанные выше, кварциты; самые крепкие песчаники и известняки	15
III	Крепкие	Крепкие граниты и близкие к ним породы; очень крепкие песчаники и известняки; кварцевые рудные жилы; крепкий конгломерат; очень крепкие железные руды	10
IIIa	»	Известняки (крепкие); некрепкий гранит; крепкие песчаники; крепкий мрамор; доломит; колчеданы	8
IV	Довольно крепкие	Обыкновенный песчаник; железные руды	6
IVa	То же	Песчанистые сланцы; сланцеватые песчаники	5
V	Средние	Крепкий глинистый сланец; некрепкий песчаник и известняк, мягкий конгломерат	4
Va	»	Разнообразные сланцы (некрепкие); плотный мергель	3
VI	Довольно мягкие	Мягкий сланец; мягкий известняк; мел; каменная соль; мерзлый грунт; антрацит; обыкновенный мергель; разрушенный песчаник, сцементированная галька и хрящ; каменистый грунт	2
VIa	То же	Щебнистый грунт, разрушенный сланец; слежавшаяся галька и щебень; крепкий каменный уголь; отвердевшая глина	1,5
VII	Мягкие	Глина (плотная); средний каменный уголь; крепкий нанос — глинистый грунт	1,0
VIIa	»	Легкая песчанистая глина; лёсс; гравий; мягкий уголь	0,8
VIII	Землистые	Растительная земля; торф; легкий суглинок; сырой песок	0,6
IX	Сыпучие	Песок; осыпи; мелкий гравий; насыпная земля; добытый уголь	0,5
X	Плывучие	Плывуны; болотистый грунт; разжиженный лёсс и другие разжиженные грунты	0,3

Коэффициент крепости породы по классификации Протодиякова, или «кажущийся коэффициент трения», отражает некоторые средние, относительные значения сопротивляемости пород различным механическим усилиям. При пользовании таблицей надо учитывать не только название породы по ее петрографическому составу, но и ее состояние (степень выветрелости, трещиноватость, характер цемента, структуру и т. д.), так как коэффициент крепости не является величиной, постоянной для данной породы, а зависит от ее состояния.

Разрабатываемость и разрыхляемость. Трудность отделения отдельных частей породы от массива называется *разрабатываемостью*. В настоящее время имеется много способов отделения кусков горной породы от массива: механические, гидравлические, взрывные, термические и др. Для каждого из этих способов разработаны различные классификации, в которых на основе экспериментальных и производственных данных горные породы разделены на ряд категорий, характеризующихся различной трудностью разрабатываемости (табл. 43).

Разрыхляемостью называют способность горной породы увеличивать свой объем при ее извлечении из массива. Она характеризуется *коэффициентом разрыхляемости* $f_{разрых}$.

Коэффициентом разрыхляемости называют отношение объема добытой из массива пробы (V_1) к объему этой же породы в естественных условиях залегания в массиве (V_2):

$$f_{разрых} = \frac{V_1}{V_2}$$

Коэффициент разрыхляемости зависит от типа породы, способа извлечения горной породы из массива, транспортирования ее и укладки, а также от длительности хранения в стволе. При длительном хранении выработанной породы происходит ее самоуплотнение. Наибольшим коэффициентом разрыхляемости характеризуются глинистые, набухающие породы, наименьшей — крепкие породы, измельченные в процессе разработки до размеров хряща и щебня.

Реологические свойства горных пород. Слово «реология» происходит от греческого глагола «рео» — течь.

Когда речь идет о жидкостях, то процесс течения представляется в виде непрерывного движения их, он видим и физически не требует особого пояснения. В твердых телах это движение не проявляется столь отчетливо, как в жидкостях. Кроме того, применительно к твердым телам — горным породам — под термином «реология» понимается совокупность некоторых свойств, связанных с влиянием внешней нагрузки во времени.

Под реологическими свойствами понимаются свойства горных пород, проявляющиеся в изменении напряженно-деформированного состояния во времени. Эти свойства проявляются в форме: а) медленного пластического течения — непрерывного роста деформаций при неизменной постоянной нагрузке; б) непрерывного падения (уменьшения) напряжения при сохранении величины деформации;

Единая классификация горных пород по разрабатываемости
(по Справочнику укрупненных норм на геологоразведочные работы
СУСН — 1968 г.)

Категории горных пород по буримости шпуров	Наименование горных пород	Способ разработки
I	Глина сухая. Лёсс рыхлый, влажный. Песок. Сульсь рыхлая. Торф и растительный слой без корней	Вручную; с применением взрывных работ при ручном бурении шпуров
II	Гравий. Суглинок легкий, лёссовидный. Торф и растительный слой с корнями или с небольшой примесью мелкой гальки и щебня	То же
III	Галька размером от 10 до 40 мм. Глина мягкая, жирная. Песчано-глинистые грунты. Дресва. Лед. Суглинок тяжелый. Щебень различных размеров	Вручную; с применением взрывных работ при ручном бурении шпуров; отбойными молотками
IV	Галька размером от 41 до 100 мм. Глина сланцеватая, моренная. Песчано-глинистые грунты с включением гальки, щебня и валунов. Суглинки тяжелые с примесью щебня	Вручную; с применением взрывных работ при бурении шпуров электросверлами и вручную; отбойными молотками
V	Алевролиты глинистые, слабо цементированные. Аргиллиты слабые. Конгломераты осадочных пород. Мергель глинистый. Мерзлые породы I—II категорий. Песчаники, слабо цементированные песчано-глинистым цементом	Вручную; с применением взрывных работ при бурении шпуров электросверлами и вручную; отбойными молотками
VI	Гипс пористый. Доломиты, затронутые выветриванием. Мерзлые породы III—V категорий. Меловые породы мягкие. Сланцы углистые	С применением буровзрывных работ или отбойными молотками
VII	Алевролиты плотные глинистые. Гипс плотный. Глины песчаные. Доломиты неизменные. Змеевика оталькованные. Известняки мягкие. Ил плотный, мелководный. Конгломераты слабых осадочных пород с известняково-глинистым цементом. Мергель известковистый. Опоки тонкозернистые. Сланцы сильно выветрелые; аспидные, хлоритовые, слюдяные. Сланцы охристые и углистые с прослойками глины	То же

Категории горных пород по буримости шпуров	Наименование горных пород	Способ разработки
VIII	Аргиллиты средней плотности. Глины отвердевшие. Змеевики с включением асбеста. Ракушечник. Сланцы метаморфизованные хлоритовые, кальцито-хлоритовые, серицитовые, кварцево-серицитовые и серицито-хлоритовые, глинистые, углисто-глинистые слабые песчаные. Туфы выветрелые. Мерзлые породы VI—VII категорий	С применением буровзрывных работ или отбойными молотками
IX	Алевролиты песчано-глинистые. Совершенно выветрелые, каолинизированные граниты, гранодиориты, диориты. Диабазы совершенно выветрелые. Мел плотный. Песчаники выветрелые каолинизированные и глинистые, крупнозернистые	То же
X	Граниты сильно выветрелые. Гипсоангидрит. Дуниты сильно выветрелые. Змеевики сильно выветрелые. Известняки мергелистые средней крепости. Конгломераты с глинистым цементом. Сланцы глинистые, кристаллические: слюдяные, серицитовые и талько-хлоритовые, углистые и горючие. Перидотиты сильно выветрелые. Песчаники с глинистым цементом	»
XI	Алевролиты с включением кварца. Амфиболиты выветрелые. Аргиллиты плотные. Гнейсы. Сильно выветрелые граниты, гранодиориты, диабазы. Дуниты выветрелые. Известняки крупнозернистые, мраморизованные, доломитизированные. Кварциты выветрелые, минерализованные. Перидотиты выветрелые. Песчаники с известковым цементом	С применением буровзрывных работ
XII	Выветрелые андезиты. Аргиллиты весьма плотные. Ангидриты. Базальты, затронутые выветриванием. Выветрелые габбро, гнейсы, граниты, диабазы. Диориты выветрелые, крупнозернистые. Доломиты плотные. Известняки среднезернистые, плотные, доломитизированные. Конгломераты с галькой из изверженных пород с известковым цементом. Липариты сильно выветрелые. Песчинки аркозовые, медяные. Порфиры сильно выветрелые, кварцевые. Роговики пироксен-плагиоклазовые. Выветрелые сиениты, скарны. Сланцы бескварцевые: хлоритовые, хлорито-серицитовые, крепкие глинистые	То же
XIII—XX	Андезиты. Альбитофиры. Габбро, трахиты, базальты, кварциты и другие особо крепкие породы	»

в) снижения прочности породы, т. е. уменьшении напряжения, вызывающего разрушение породы с увеличением времени воздействия нагрузки.

Явление роста деформаций при постоянной нагрузке получило название *ползучести*, или *крипа*. Явление уменьшения — расслабления или рассасывания напряжения во времени — называют *релаксацией*. Эти свойства наиболее характерны для рыхлых — связанных пород (глин) и некоторых разностей пород с жесткими связями

(полускальные породы, к которым В. Д. Ломтадзе относит породы с временным сопротивлением сжатию менее 500 кг/см^2 , — мергели, аргиллиты и др.)¹. В крепких скальных породах явление пластического течения — ползучести, или крипа, проявляются исключительно медленно — в геологическом разрезе времени (эпохи, века) при сверхвысоких давлениях и при большой температуре, т. е. на больших глубинах.

В обычных условиях — на поверхности Земли и на небольших глубинах скальные породы деформируются весьма быстро и при больших давлениях эти деформации носят не пластический, а хрупкий характер.

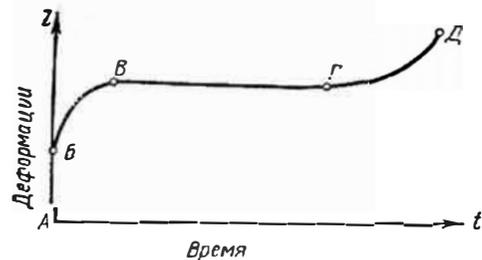


Рис. 40. Диаграмма ползучести породы

Наибольший практический интерес представляет проявление реологических свойств так называемых полускальных горных пород в зависимости от скорости нарастания нагрузки и в зависимости от длительности действия этой нагрузки. Первое определяет сопротивление пород в основаниях сооружений в процессе их возведения, а второе — в процессе их эксплуатации.

Ползучесть полускальных и глинистых пород наблюдается часто в природных условиях. Под влиянием длительного воздействия веса вышележащих толщ массивы горных пород начинают «ползти». В результате образуются складки и зеркала скольжения. Это очень часто наблюдается в горных выработках при вскрытии различных месторождений. Под влиянием ползучести породы часто разрушается монолитная крепь капитальных горных выработок. По этой же причине происходит уменьшение сечения глубоких буровых скважин, пучение пород в выработках и оползневые процессы, поэтому при изучении некоторых типов пород с жесткими связями необходимо не только учитывать действующие силы на породу, но и продолжительность их воздействия, так как это дает возможность судить об их прочности и деформируемости при взаимодействии с сооружениями, создающими значительные напряжения в массиве и рассчитанными на длительное время.

Если провести длительный опыт по изучению развития деформаций во времени при постоянной нагрузке, то по данным этого опыта можно построить диаграмму ползучести (рис. 40). Изображенная на рис. 40 кривая состоит из четырех отрезков. Первый отрезок *АВ* характеризует деформации, возникающие от мгновенно приложенной нагрузки. По характеру эти деформации могут быть упругими или одновременно упругими и пластическими. Второй отрезок *БВ*

¹ С нашей точки зрения, этот критерий для выделения группы полускальных пород не обоснован и является весьма условным.

твечает неустановившейся ползучести, проявляющейся в затухании скорости нарастания деформаций. Третий отрезок *ВГ* характеризует установившуюся ползучесть, т. е. нарастание деформаций с постоянной скоростью. Четвертый отрезок *ГД* отражает прогрессирующее нарастание деформаций с возрастающей скоростью и характеризует разрушение породы (точка *Д*).

Анализ указанной кривой показывает, что прочность пород при длительной нагрузке изменяется. В связи с этим возникает необходимость определять *длительную прочность породы*. Под длительной прочностью горной породы понимают напряжение, которое вызывает разрушение породы через длительный промежуток времени в процессе развития деформаций ползучести. В отличие от длительной прочности обычная, или стандартная (условно мгновенная прочность), характеризует напряжение, вызывающее разрушение породы при сравнительно кратковременной нагрузке ее.

Т а б л и ц а 44

Значения длительной прочности некоторых горных пород (по М. М. Протодяконову, 1969)

Название породы	Предел прочности при кратковременной нагрузке $R_{сж.к}$, кг/см^2	Предел прочности при длительной нагрузке $R_{сж.дл.}$, кг/см^2
Известняк	380	280
Песчаник	760	490
Глинистый сланец	300—400	150—180
Мел пишущий (КМА)	37	23
Мергель алевритовый (КМА)	31	21
Глина плотная	13,5	10

Установлено, что предел длительной прочности породы значительно ниже, чем предел прочности той же породы при кратковременной нагрузке (табл. 44).

Из сказанного ясно, что время воздействия нагрузки является одним из важнейших факторов, определяющих поведение горных и особенно полускальных пород при взаимодействии с различными сооружениями. Учет этого фактора особенно важен для прогноза поведения пород под капитальными сооружениями с длительным сроком службы (гравитационные плотины, туннели, шахтные стволы и др.).

Прогнозные расчеты делаются посредством экстраполяции кривых длительной прочности (рис. 41) в область длительного времени. При этом весьма полезно также использовать опытные наблюдения за поведением пород под сооружениями, существующими длительное время.

Для построения кривой ползучести проводят серию опытов на сжатие, в процессе которых регистрируют время от начала нагрузки образца до момента разрушения его при данном напряжении. Затем строят кривую, показанную на рис. 41. Получение пределов

длительной прочности по данным реологических испытаний пород требует проведения долговременных опытов, измеряемых многими годами. Разумеется, что осуществлять такие опыты для практических целей невозможно, поэтому принято считать, что характер и особенности поведения пород при длительном нагружении достаточно хорошо выявляются при длительности опытов на 2—3 порядка меньше времени службы сооружения. Предел длительной прочности $R_{сж. дл}$ определяют из указанного графика как напряжение,

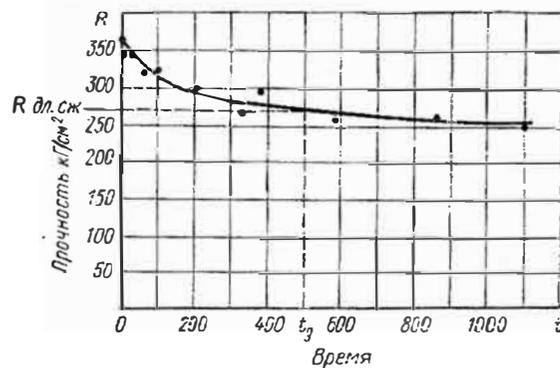


Рис. 41. Кривая длительной прочности горной породы

вызывающее разрушение породы при заданном времени t_g . Это время обуславливается длительностью службы сооружения. Часто за предел длительной прочности принимается максимальное напряжение, не вызывающее разрушение образца в течение 1000 ч.

В последнее время предпринимаются попытки ускорить получение характеристик длительной прочности пород. Изучением этого вопроса занимается Ю. М. Карташов, который разработал и обосновал методику определения ползучести пород с помощью вибрационных установок. Применение этой методики позволяет ускорять время опытов в 50—100 раз.

Сейсмоакустические методы изучения массивов пород. Вследствие описанного выше различия в прочности породы в образце и в массиве переносить данные определения свойств скальных пород по образцам на весь изучаемый массив горной породы весьма затруднительно, а порой даже невозможно. Проектирование и строительство крупных сооружений и прежде всего гидротехнических, создающих значительные нагрузки на породы основания, не могут базироваться только на изучении свойств пород в отдельных точках по образцам в лабораторных и полевых условиях. Для оценки оснований таких сооружений необходимо знание свойств породы в массиве, вовлекаемом в сферу воздействия инженерного сооружения, и изменения этих свойств в пространстве. Это особенно важно для сооружений с большими размерами основания.

Для изучения массива горных пород в условиях естественного залегания и с учетом его анизотропии в настоящее время успешно применяется инженерная сейсмоакустика. Сейсмоакустические методы позволяют изучить геологическое строение массива (глубину залегания скальных пород, литологическое расчленение толщ, наличие тектонических нарушений и зон ослабленных пород, зоны выветривания скальных пород) и физико-механические свойства

пород (модуль упругости, коэффициент Пуассона, пористость и др.). Базируются эти методы на теории упругости. В основе их лежит представление о линейной связи между скоростями распространения сейсмических волн в горных породах и упругими характеристиками пород.

В силу присущих массивам горных пород неоднородности, анизотропности и зависимости деформаций от величины и времени действия нагрузки они отличаются от идеально упругих тел, для которых разработана теория упругости. Эти особенности горных пород обуславливают различие в значениях статического модуля упругости (E_c), определяемого по прикладываемой к породе нагрузке и соответствующей ей деформации, и динамического модуля упругости (E_d), вычисляемого по значениям скоростей распространения сейсмических волн.

При напряжениях, возникающих в горных породах при распространении сейсмических волн, а также при кратковременном (десятые и сотые доли секунды) действии напряжений, горные породы ведут себя практически как упругие тела.

В соответствии с классической теорией упругости в безграничных однородных средах могут распространяться упругие волны двух типов: продольные, или волны сжатия, и поперечные, или волны сдвига.

Измеряя скорости распространения продольных и поперечных волн в горных породах, можно по имеющимся теоретическим зависимостям вычислить динамический модуль упругости, статический модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел прочности на сжатие, объемную трещиноватость, пористость. Для решения этих и других задач используется комплекс сейсмоакустических исследований.

1. Сейсморазведка на наземных профилях по методике продольного профилирования (корреляционный метод преломленных волн — КМПВ).
2. Сейсмические, акустические и ультразвуковые исследования в горных выработках.
3. Сейсмическое просвечивание между горными выработками и скважинами.
4. Ультразвуковой каротаж скважин.
5. Ультразвуковые измерения на образцах горных пород. В основе всех перечисленных методов лежат эксперименты по измерению времени прохождения упругих колебаний между двумя определенными точками, на одной из которых располагается источник, возбуждающий упругие колебания, а на другой — прибор-приемник, регистрирующий колебания. Фиксируя момент возбуждения колебаний и время подхода колебаний к точке их регистрации, определяют скорость распространения волн.

Для возбуждения колебаний обычно используют взрывы небольшой мощности и удары. Колебания регистрируют сейсмические станции типа СС-24П или другая ультразвуковая аппаратура (типа ИПА-59 и др.) и лаборатории акустического каротажа ЛАК-1,

СПАК-1 и др. Получив в результате сейсмоакустических исследований значения продольных (v_p) и поперечных (v_s) волн, переходят к вычислению других параметров.

Коэффициент Пуассона μ определяется по отношению $\frac{v_s}{v_p}$ или по специальным номограммам. Используя значения μ , иногда строят график $\mu=f(v_p)$, по которому определяют корреляционное

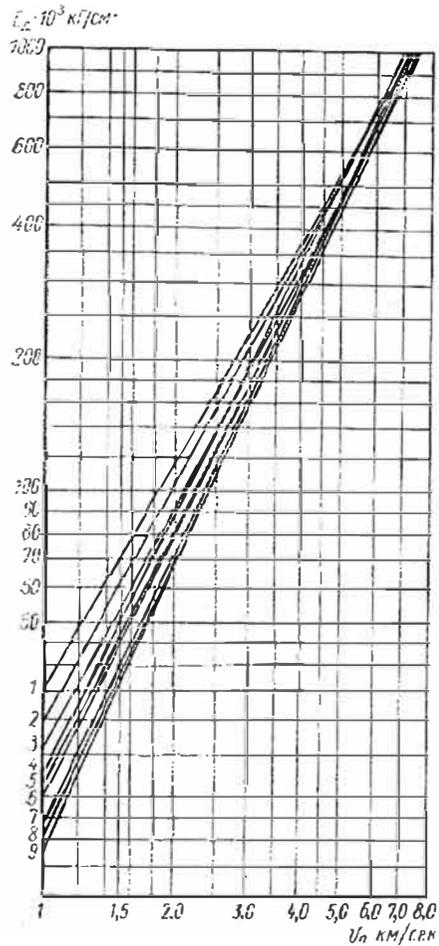


Рис. 42. График зависимости динамического модуля упругости от скорости распространения продольных волн (v_p) (по А. И. Савичу, В. И. Коптеву, 1969)

где $E_{d_{\max}}$ — максимальное значение динамического модуля упругости для данной породы; α и β — постоянные безразмерные величины.

уравнение связи между величинами v_p и μ , которое затем используют для определения значений μ на тех участках, где по каким-либо причинам не удалось зафиксировать скорости поперечных волн.

Динамический модуль упругости (E_d) определяется по скорости распространения продольных волн и коэффициенту Пуассона по формуле

$$E_d = \frac{v_p^{2\delta} (1 - \mu)}{(1 + \mu) (1 + 2\mu)},$$

где δ — объемный вес изучаемой породы.

Динамический модуль может быть также определен по эмпирической зависимости между E_d и v_p (рис. 42).

Статический модуль упругости в отличие от модуля упругости (модуля общей деформации), определяемого экспериментально — путем передачи на породу статической нагрузки, правильнее называть приведенным статическим модулем упругости. Он может быть определен по формуле

$$E_c = \alpha \left(\frac{E_d}{E_{d_{\max}}} \right)^\beta \cdot E_d,$$

На рис. 43 приведен график $E_c=f(E_d)$ по Никитину В. Н. Для этого графика $\alpha=0,97$; $\beta=0,141$ и $E_{d_{\max}}=1300000$ кг/см².

Значения v_p и v_s , получаемые при сейсмоакустических исследованиях, используются для приближенной оценки предела прочности породы на сжатие. Он может быть вычислен по формулам Ф. М. Ляховицкого:

$$\sigma_{сж} = \frac{v_p^{2\delta} (1 - 2\mu)^2}{140g (1 - \mu)^2};$$

$$\sigma_{сж} = \frac{v_s^{2\delta} (1 - 2\mu)}{70g (1 - \mu)},$$

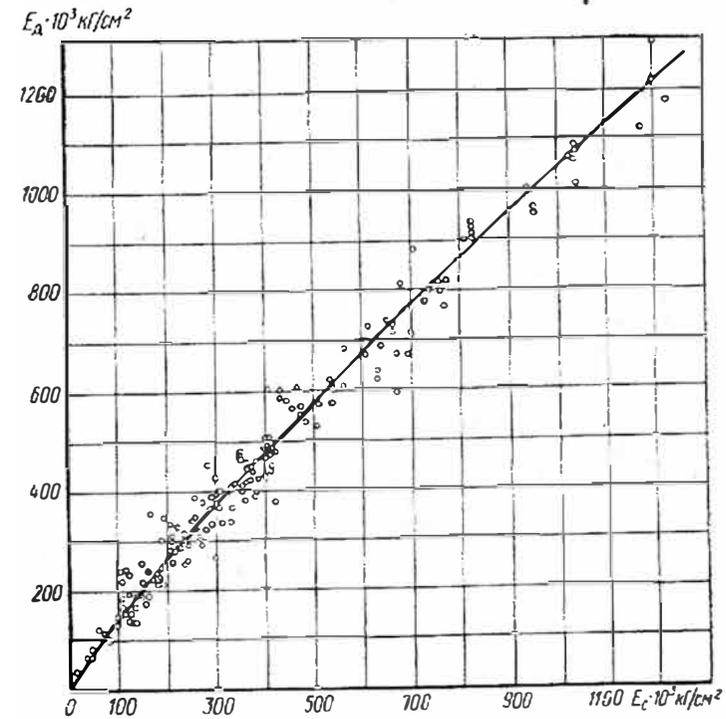


Рис. 43. График связи между динамическим (E_d) и статическим (E_c) модулями упругости

где g — ускорение силы тяжести; остальные обозначения прежние. Объемная трещиноватость, или относительный объем трещин в единице объема породы, может быть определена по формуле

$$T = \frac{E_{3д} (E_{1д} - E_{2д})}{E_{2д} (E_{1д} - E_{3д})} \cdot 100\%,$$

где $E_{1д}$, $E_{2д}$, $E_{3д}$ — динамические модули упругости, определенные сейсмоакустическим методом соответственно для массива монолит-

СЖИМАЕМОСТЬ (ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА) НЕСЦЕМЕНТИРОВАННЫХ (ДИСПЕРСНЫХ) ПОРОД

ной породы, трещиноватой зоны той же породы и для материала, заполняющего трещины.

Открытая пористость породы (объем пустот в единице объема породы) может быть оценена по комплексу данных ультразвукового каротажа и исследований керна скважин по формуле

$$n = C \frac{v_2 - v_1}{v_1 - v_2} \cdot 100\%,$$

где v_1 — скорость продольных волн, определенная по сухому керну; v_2 — скорость продольных волн, определенная ультразвуковым каротажем; C — коэффициент скорости, равный 450 м/сек.

Контрольные вопросы

1. Что следует понимать под механическими свойствами пород и от каких факторов они зависят?
2. Какие деформации происходят в скальной горной породе при воздействии на нее внешней нагрузки?
3. Какими показателями характеризуются упругие свойства горных пород?
4. Что такое механическая прочность горных пород, какими показателями ее характеризуют и какими факторами она определяется?
5. Что такое морозоустойчивость и размягчаемость, как их определяют?
6. Что такое твердость горных пород и как она определяется?
7. Что понимают под крепостью горных пород и какими величинами она оценивается?
8. Реологические свойства горных пород и методы их определения.
9. Принципы оценки физико-механических свойств скальных пород в массиве сейсмоакустическими методами.

Литература

- Воробьев В. А. Лабораторный практикум по общему курсу строительных материалов. М., Гос. изд-во лит. по строит. мат., 1955, гл. 1.
- Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Под ред. Е. М. Сергеева. Т. 2. М., Изд-во МГУ, 1968, гл. 33, 35.
- Савич А. И., Коптев В. И., Никитин В. Н., Яценко З. Г. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М., «Недра», 1969.
- Ильницкая Е. И., Тедер Р. И. Свойства горных пород и методы их определения. Под ред. М. М. Протоdjяконова. М., «Недра», 1969.

Под действием внешней нагрузки породы деформируются. В общем случае эти деформации заключаются в сжатии. Под сжимаемостью пород понимают способность их деформироваться под нагрузками с уменьшением объема. Эти деформации вызывают осадки сооружений.

Характер деформации, ее величина и явления, наблюдаемые при сжатии породы, зависят от типа породы и обстановки, в которых происходит сжатие. Эта обстановка определяется граничными условиями деформации.

Песчаные и глинистые породы характеризуются различной степенью сжимаемости.

Сжатие песчаных пород связано с взаимным перемещением отдельных зерен относительно друг друга, более компактной укладкой их, а при больших нагрузках и сколом неровностей и раздроблением зерен. Оно обычно невелико по размерам, быстро по времени и не зависит от влажности.

Характерной особенностью связанных глинистых пород, отличающей их от других пород, является, как уже отмечалось выше, их способность к пластическим деформациям под небольшими нагрузками. В сухом состоянии и при очень малой влажности они обладают почти такой же механической прочностью, как и твердые скальные горные породы. Влажные — пластичные глины деформируются при сжатии без видимого разрушения. В таких породах большую роль играют гидратные оболочки вокруг минеральных частичек и поровая вода, воспринимающие на себя нагрузку. Под влиянием нагрузки в поровой воде возникает поровое давление, которое постепенно, по мере выдавливания воды из породы, снижается. Когда оно совсем исчезает, давление целиком переходит на скелет породы.

Деформируемость пород определяется их структурой, степенью дисперсности (гранулометрическим составом), минералогическим составом, влажностью, коэффициентом фильтрации, химическим составом, концентрацией порового раствора и другими факторами. Большое влияние на деформации пород, особенно глинистых, оказывает способ нагружения породы — скорость нарастания нагрузки и характер нагрузки (статическая — динамическая).

Сжатие образцов одной и той же породы с нарушенным и ненарушенным естественным сложением резко различно. Образцы с нарушенным сложением при прочих равных условиях сжимаются

больше. Значительное влияние на сжатие оказывает характер и прочность связей в породе. Глинистые породы с прочными структурными связями сжимаются меньше, чем глины, лишенные связей. Плотные дочетвертичные глины с небольшой пористостью деформируются значительно меньше, чем современные неуплотненные аллювиальные или озерные отложения.

При одинаковых условиях сжатия больше сжимаются породы, у которых выше дисперсность. Это объясняется тем, что тонкодисперсные породы, обладая большой удельной поверхностью, связывают на своей поверхности больше воды, которая и обуславливает большую деформируемость породы. Такое же влияние оказывает и минералогический состав. Наиболее гидрофильные минералы (например, монтмориллонит) связывают большое количество воды, а поэтому и характеризуются большей сжимаемостью. По этой же причине глины, содержащие в поглощенном комплексе Na^+ , обладают большей сжимаемостью, чем глины, насыщенные Ca^{2+} .

Скорость процесса сжатия песчаных пород практически не зависит от их фильтрационной способности. Сжатие же глинистых пород во времени зависит от фильтрационной способности пород. Чем выше фильтрационная способность породы, тем быстрее из нее выдавливается вода и тем быстрее протекает процесс сжатия.

Если порода содержит мало гравитационной воды и большая часть пор занята воздухом (газом), который сообщается с атмосферой, сопротивление сжатию оказывают гидратные оболочки связанной воды, силы молекулярного притяжения частиц породы трение перемещающихся частиц и структурные связи.

Значительное влияние на сжимаемость пород оказывает температура породы; сжимаемость и скорость сжатия увеличиваются при увеличении температуры. Это объясняется тем, что при повышении температуры уменьшается вязкость воды, увеличивается водопроницаемость породы и вода более интенсивно выжимается из пор. Нагрузка на породу может быть статической ударной и динамической.

Ударная нагрузка (мгновенная) может вызвать быстро протекающие деформации, приводящие к разрушению пород вследствие возникающих в ней больших гидродинамических напряжений. Статическая нагрузка (постепенное нарастание нагрузок) вызывает постепенное перераспределение напряжений между жидкой и твердой фазами породы. При увеличении ступени (размера) и скорости нарастания нагрузки увеличивается сжатие глинистых пород. Этим в значительной мере объясняется различная сжимаемость одной и той же глинистой породы при проведении опытов в лабораторной обстановке и под воздействием нагрузки от сооружения. Скорость нарастания нагрузки при лабораторных экспериментах, как правило, значительно больше скорости ее нарастания в процессе строительства, поэтому часто фактическая осадка сооружений оказывается значительно меньше осадки, рассчитанной по данным лабораторных испытаний.

Динамические нагрузки (вибрация), ослабляя связи и нарушая

естественное сложение породы, могут вызывать явления пльвунности водоносных песков и тиксотропные явления (разжижение — переход из гелеобразного состояния в золь) в глинистых породах в период механического воздействия и обратный переход из золя в гель после прекращения механического воздействия.

В результате воздействия сжимающих нагрузок в породе возникают, как уже говорилось ранее, два типа деформаций: упругие и остаточные. Упругие деформации складываются из упругих деформаций твердых минеральных частиц породы и упругих деформаций гидратных оболочек, а при трехфазной системе — и из упругих изменений пузырьков воздуха в поровом растворе. Остаточные деформации вызваны частично разрушением структурных связей в структурных породах и, таким образом, взаимным перемещением минеральных частиц и частично разрушением частиц. Поэтому в породах в противоположность другим твердым телам остаточные деформации не являются признаком разрушения породы.

Соотношение упругих и остаточных видов деформаций в глинистых и песчаных породах различно. В глинистых породах, как правило, общая величина упругих деформаций значительно больше упругих деформаций минеральных частиц. Эту особенность Е. М. Сергеев объясняет значительными упругими деформациями пленок связанной воды. Он доказал также, что в глинах под влиянием даже очень больших давлений (до 20000 кг/см^2) существенного раздробления минеральных частиц не происходит. Остаточные деформации глин возникают главным образом за счет изменения текстуры глинистых пород под давлением и перемещения (сближения) минеральных частиц.

Е. М. Сергеев исследовал также изменение дисперсности песков различного минералогического состава и установил, что под влиянием нагрузок $>200 \text{ кг/см}^2$ происходит значительное дробление песчаных частиц. Дробление, перемещение и более компактная упаковка частиц обуславливают остаточные деформации в песках. При значениях нагрузок, фактически достигаемых в процессе лабораторных исследований песков, деформации дробления практического значения не имеют.

В зависимости от граничных условий деформирования пород при сжатии различают: а) деформацию пород при сжатии без возможности бокового расширения — компрессию; б) деформацию пород при трехосном сжатии с ограниченным боковым расширением; в) деформацию пород при свободном боковом расширении — одноосное сжатие.

Показатели сжимаемости определяются как в лабораторных условиях на образцах с ненарушенной или нарушенной структурой, так и в полевой обстановке в естественных условиях залегания пород.

Компрессия пород. Как уже было сказано выше, под компрессией понимается сжатие породы в условиях невозможности бокового расширения. Испытание на компрессию производят в ла-

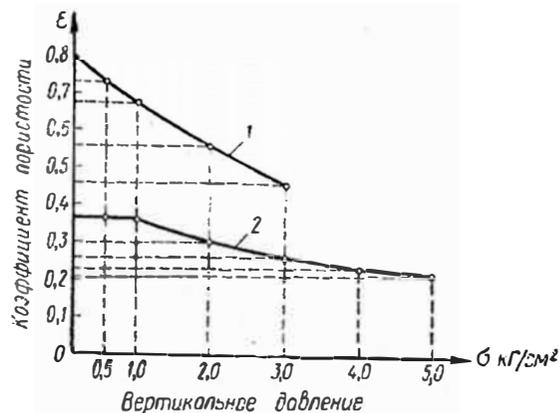


Рис. 44. Компрессионные кривые образцов глины: 1 — сильносжимаемого аллювиального суглинка; 2 — слабосжимаемой каменноугольной глины

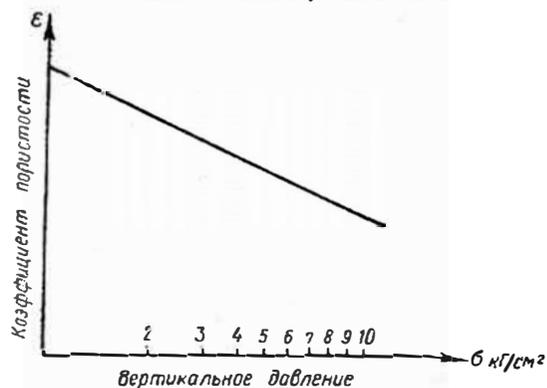


Рис. 45. Компрессионная кривая в полулогарифмическом масштабе

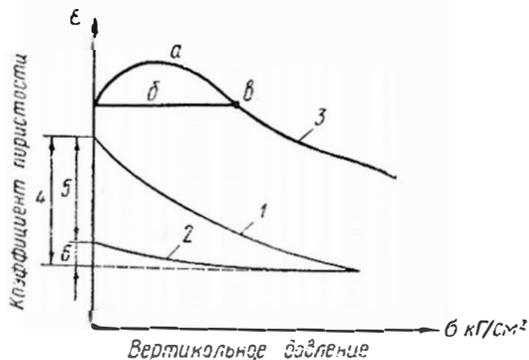


Рис. 46. Компрессионные кривые: 1 — кривая компрессии породы; 2 — кривая декомпрессии (набухания) той же породы; 3 — компрессионная кривая образцов пород с венарушенной структурой; 4 — общая деформация; 5 — остаточная деформация; 6 — упругая деформация

бораторных условиях в приборах, которые называются *одографами* или *компрессионными приборами*.

Далее мы будем рассматривать породу как двухфазную систему, состоящую из двух компонентов — скелета и воды, заполняющей все поры скелета. Если такую систему поместить в прибор с жесткими стенками, исключая возможность бокового расширения, и приложить к ней вертикальную нагрузку σ , то под влиянием этой нагрузки порода будет уплотняться, т. е. уменьшаться в объеме за счет уменьшения пористости и влажности. Сжимаемость частиц породы при небольших давлениях можно пренебречь. Уплотнение под данной нагрузкой продолжается до тех пор, пока не будет удален весь избыток воды, вызванный уменьшением пористости породы. В этом случае каждой сообщенной на породу нагрузке будут соответствовать определенные пористость и влажность.

Графически зависимость пористости (влажности) от давления изображают кривой: на оси абсцисс откладывают значения вертикального давления σ кг/см², на оси ординат — соответствующие им значения коэффициента пористости. Через точки пересечения этих значений проводится кривая, которая называется *компрессионной кривой* (рис. 44). За рубежом распространен способ построения этой кривой в полулогарифмическом масштабе (величину давления откладывают в логарифмическом масштабе, а коэффициент пористости — в обыкновенном). В этом случае (рис. 45) зависимость $\epsilon = f(\sigma)$ будет графически выражаться прямой линией.

Характер компрессионной кривой, отражающей степень сжимаемости породы и зависящей от факторов, указанных выше, будет различный. Кривая 1 на рис. 46 имеет плавный вид и характеризует глинистую породу с нарушенным сложением.

Для образцов глинистых пород с ненарушенным сложением компрессионная кривая 3 не имеет плавного характера, определяемого логарифмическим уравнением

$$\epsilon = \epsilon_1 - \frac{1}{A} \ln \frac{\sigma}{\sigma_1},$$

а несколько иную форму с горизонтальной площадкой (б) в начале или даже выпуклой частью (а). Это значит, что в течение какого-то времени давление увеличивалось, а коэффициент пористости оставался неизменным (б) или даже увеличивался (а). Объяснить подобное явление можно двумя причинами: а) наличием прочных структурных связей, которые характерны для многих глин дочетвертичного возраста, или б) набуханием, когда давление набухания оказывается больше прилагаемой внешней нагрузки. Иногда действуют одновременно обе причины.

Давление, отвечающее точке в на кривой 3 рис. 46, называется давлением *начального сопротивления породы* (давление набухания, структурная прочность). Для переуплотненных глин оно может достигать 10 кг/см² и более.

Если первоначально нагруженную породу постепенно разгрузать, то объем ее, а следовательно, и пористость будут увеличиваться.

ваться. Это явление, противоположное компрессии, носит название *декомпрессии*, или *набухания*. Однако объем (пористость) образца породы в процессе декомпрессии не достигает прежних размеров. Увеличение пористости породы при снятии давления характеризует *упругие деформации породы*, а разница между первоначальной пористостью и пористостью породы после стабилизации и декомпрессии — *остаточные деформации*. Графически явление декомпрессии, или набухания, изображается восходящей ветвью компрессионной кривой (кривая 2 на рис. 46).

Часто вместо кривой типа $e=f(\sigma)$ строят кривую зависимости относительного сжатия от давления:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = e = f(\sigma),$$

где h_0 — начальная высота образца, Δh — деформация образца под данной нагрузкой. Характер этой кривой показан на рис. 47.

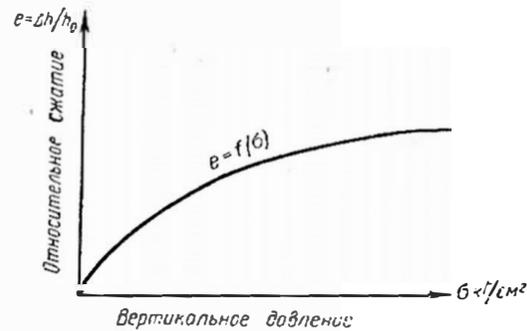


Рис. 47. Кривая зависимости относительного сжатия от давления

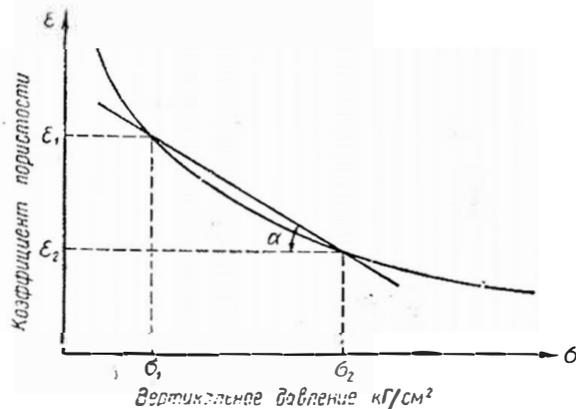


Рис. 48. График определения коэффициента уплотнения

Степень сжимаемости породы при компрессионных испытаниях обычно выражают через *коэффициент уплотнения*, или *коэффициент компрессии* a . Величина коэффициента компрессии может быть определена по графику $e=f(\sigma)$. Для небольших интервалов изменения давления компрессионная кривая может быть заменена прямой (рис. 48). Допускаемая при этом погрешность в пределах обычных давлений в основании сооружений практического значения не имеет. Тангенс угла ($\operatorname{tg} \alpha$) наклона этой прямой характеризует коэффициент компрессии. Коэффициент компрессии выражается уравнением

$$a = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_1} \text{ см}^2/\text{кг},$$

где ε_1 — коэффициент пористости при давлении σ_1 ; ε_2 — коэффициент пористости при давлении σ_2 .

Это уравнение выражает закон уплотнения: при небольших изменениях уплотняющего давления изменение коэффициента пористости прямо пропорционально изменению давления.

По величине коэффициента компрессии породы по степени сжимаемости разделяют на три группы: *сильносжимаемые* — $a > 0,01 \text{ см}^2/\text{кг}$; *среднесжимаемые* — $0,01 > a > 0,001 \text{ см}^2/\text{кг}$; *слабосжимаемые* — $a < 0,001 \text{ см}^2/\text{кг}$.

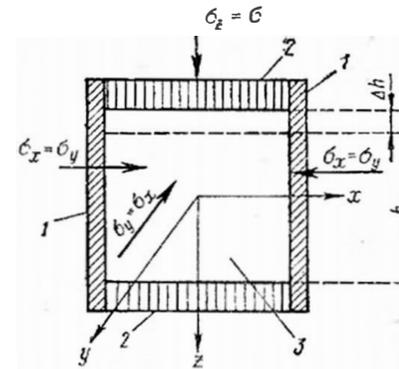


Рис. 49. Схема деформации образца в компрессионном приборе:

1 — жесткие стенки прибора; 2 — пористые металлические прокладки; 3 — образец сжимаемой породы; h_0 — начальная высота образца; Δh — уменьшение высоты образца под давлением; $\sigma_x = \sigma_y$ — боковое давление (реакция стенок прибора); σ_z — нормальное давление

Как уже было сказано выше, порода, испытываемая в компрессионном приборе, под действием вертикального давления σ деформируется только в направлении действия этой нагрузки, т. е. по оси z (рис. 49). Боковых деформаций в направлении осей x и y в породе не будет вследствие сопротивления жестких стенок прибора. В то же время боковые грани образца породы будут испытывать боковые давления $\sigma_x = \sigma_y$, вызываемые реакцией жестких стенок прибора.

Соотношение между вертикальным и боковым давлением выражается уравнением

$$\sigma_x = \xi \sigma_z,$$

где ξ — коэффициент бокового давления.

Лабораторное определение коэффициента бокового давления производится в приборе трехосного сжатия — *стабилометре* (см. стр. 198).

По данным ряда исследователей, коэффициент бокового давления изменяется от 0,40—0,42 для песков до 0,70—0,75 для глин.

Общая деформация горной породы при сжатии характеризуется *модулем общей деформации*, который аналогичен модулю упругости, используемому для характеристики деформации твердых тел. Отличие заключается в том, что при определении модуля общей деформации учитываются как упругие, так и пластичные (остаточные) деформации, а модуль упругости отражает только упругие деформации. Модуль общей деформации определяется по формуле

$$E_0 = \frac{(1 - \xi)(1 + 2\xi)}{1 + \xi} \cdot \frac{1 + \epsilon_0}{a} \text{ кг/см}^2$$

или ориентировочно по соотношению

$$E = \frac{1}{a} \text{ кг/см}^2.$$

Н. Н. Маслов для характеристики сжимаемости пород предложил определять также модуль осадки, под которым понимается осадка (уменьшение мощности) слоя породы мощностью 1 м под данной нагрузкой. Он определяется по данным компрессионных испытаний по формуле

$$l_0 = 1000 \frac{\Delta h}{h_0} \text{ мм/м},$$

где l_0 — модуль осадки при давлении σ ; Δh — уменьшение высоты образца под этой же нагрузкой, мм; h_0 — начальная высота образца, мм.

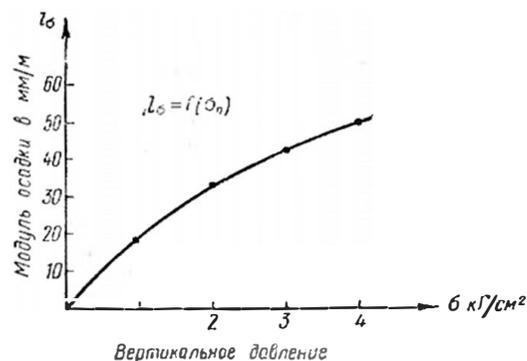


Рис. 50. Кривая зависимости модуля осадки от давления

Как уже отмечалось выше, процесс сжатия глинистых пород под нагрузкой происходит в течение продолжительного времени. Иногда этот процесс продолжается в течение веков. Например, всем

известен памятник строительного искусства Пизанская башня (Италия), строительство которой было начато в 1174 г. и закончено в 1350 г. Давление этой башни на породы основания фундамента ее вызвало уплотнение слабых глинистых пород, которое началось с момента начала строительства и продолжается до настоящего времени. В результате произошла односторонняя осадка башни и верх ее отклонился от вертикальной оси на 4,9 м.

Уплотнение пластичных девонских глин под зданием Свирской ГЭС продолжалось почти 25 лет.

Процесс уплотнения глинистых пород во времени носит название *консолидации*.

Для количественной характеристики консолидации служит особый показатель — *степень консолидации*, которая представляет собой отношение сжатия (осадки) образца в компрессионном приборе в некоторый момент времени T к полному его сжатию по окончании процесса консолидации под данным давлением:

$$\Theta = \frac{\Delta h_T}{\Delta h} 100 \%,$$

где Θ — степень консолидации, %; Δh_T — уменьшение высоты образца (осадка) под давлением на момент времени T от начала сжатия, мм; Δh — полная осадка образца после прекращения деформации сжатия под той же нагрузкой, мм.

Эту зависимость можно представить в виде кривой (рис. 51).

В зависимости от характера породы следует различать два типа консолидации. Первый тип наблюдается в пылеватых и песчано-глинистых породах со слабыми водно-коллоидными связями. Он обуславливается водопроницаемостью пород и условиями оттока выжимаемой из породы воды. Консолидация этих пород зависит в значительной мере от фильтрационной особенности их и получила название *фильтрационной консолидации*.

Второй тип консолидации наблюдается в тяжелых глинистых породах со значительными водно-коллоидными, структурными связями, которые осложняют уплотнение пород. Этот процесс изучен очень слабо.

Данные компрессионных испытаний используются для расчета осадок сооружений. Расчет осадки отдельного фундамента производится по формуле

$$S = \sum_1^n = \sigma_i h_i \frac{\beta}{E_i},$$

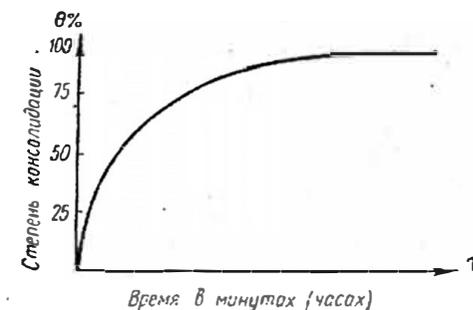


Рис. 51. Кривая консолидации

где n — число слоев, на которые разбита сжимаемая толща основания фундамента; σ_i — полусумма вертикальных давлений, кг/см^2 , возникающих на верхней и нижней границах i -слоя породы от давления, передаваемого сооружением; h_i — мощность i -слоя породы, см ; β — безразмерный коэффициент, корректирующий упрощенную схему расчета, принимаемый для пород равным 0,8; E_i — модуль общей деформации i -слоя породы, кг/см^2 .

Методика и приборы для проведения компрессионных испытаний. Практически испытание пород для построения компрессионной кривой обычно состоит в том, что образец изучаемой породы помещается в металлический цилиндр компрессионного прибора и подвергается равномерно распределенной нагрузке σ . Дно и поршень цилиндра оборудованы специальными пористыми прокладками, отводящими выдавливаемую из образца воду.

Внешняя нагрузка на образец вызывает его деформации, которые в условиях невозможности бокового расширения будут выражаться в уменьшении высоты образца за счет уменьшения пористости. Изменение высоты образца регистрируется специальными приборами-индикаторами (мессура) с точностью до 0,01 мм. Увеличение нагрузки производится ступеньками, после того как оканчивается сжатие образца под воздействием предыдущего давления.

Предварительно для испытываемой породы определяют удельный вес (γ), объемный вес (Δ), начальную влажность (W_0) и начальный (природный) коэффициент пористости (ϵ_0).

Каждая последующая ступень давления увеличивается вдвое (например, 0,5, 1, 2, 4 и т. д. кг/см^2). Величина первой ступени нагрузки иногда определяется давлением, которое испытывала порода в природных условиях. Последняя ступень нагрузки определяется нагрузкой от проектируемого сооружения, увеличенной на 1—2 кг/см^2 .

За критерий условной стабилизации деформаций принимается для мягких, сильно пластичных глин нарастание деформации на 0,01 мм за 12 ч для плотных глин и 0,01 мм за 3—5 ч для песчаных.

Породы, залегающие в основании проектируемых сооружений, испытываются в образцах с ненарушенным сложением, а породы, изучаемые в качестве материала для земляных сооружений (плотин, дамб, насыпей и т. д.), — с нарушенным сложением, но при той влажности и плотности, с которыми их намечается укладывать в тело сооружения.

Испытание водонасыщенных и водоненасыщенных пород, которые после возведения сооружения окажутся под водой, проводятся в условиях погружения испытываемого образца под воду.

Породы, которые в процессе строительства и эксплуатации сооружений не будут дополнительно увлажняться, испытываются с сохранением естественной влажности.

В результате опыта получают ряд экспериментальных значений: $\sigma_1 - \Delta h_1$, $\sigma_2 - \Delta h_2$, $\sigma_3 - \Delta h_3$ и т. д., по которым можно рассчитать изменение коэффициента пористости:

$$\Delta \epsilon_n = \frac{\Delta h_n}{h_0} (1 + \epsilon_0)$$

и значения коэффициента пористости, отвечающие соответствующим давлениям $\epsilon_n = \epsilon_0 - \Delta \epsilon_n$. По полученным значениям строится компрессионная кривая, и определяются по указанным выше формулам коэффициент компрессии и модуль общей деформации для любых интервалов давлений в пределах построенной компрессионной кривой.

Для производства компрессионных испытаний в настоящее время разработано большое количество приборов — *одометров*, отличающихся небольшими конструктивными особенностями. Состоят они из трех основных частей: 1) рабочего цилиндра (кольца), в котором производится сжатие породы; 2) устройства для передачи на испытываемый образец требуемого давления (штамп и система рычагов) и 3) измерителей деформации образца.

Наибольшее распространение в настоящее время получили приборы конструкции ЦНИИ МПС, НИС Гидропроекта и др. (рис. 52).

Просадочность. Некоторые породы сжимаются под влиянием увлажнения. Эту особенность пород называют *просадочностью*. Она вызывается резким уменьшением прочности структурных связей между частицами породы под влиянием воды.

Просадочность характерна для лёссов и лёссовидных пород, которые называют *макропористыми породами*. Поры в них различимы невооруженным глазом.

Выявление степени просадочности имеет большое практическое значение при проектировании строительства и нормальной эксплуатации различных сооружений.

Для качественной характеристики просадочности Н. Я. Денисов предложил использовать отношение $\frac{\epsilon_f}{\epsilon_0}$, где ϵ_f — коэффициент пористости породы при верхнем пределе пластичности, а ϵ_0 — коэффициент пористости при естественной влажности. По Денисову, при $\frac{\epsilon_f}{\epsilon_0} < 1$ порода просадочная, при $\frac{\epsilon_f}{\epsilon_0} > 1$ — непросадочная.

По СНиП II-Б.1—62, к просадочным относятся глинистые породы, характеризующиеся степенью влажности $K_w \leq 0,6$ и значением

$$\frac{\epsilon_0 - \epsilon_f}{1 + \epsilon_0} \geq -0,1.$$

Грунтовые условия строительных площадок в зависимости от возможности проявления просадки под влиянием собственного веса породы при замачивании по СНиП II-Б.2—62 разделяются на два типа. К первому типу относятся породы, у которых просадка от собственного веса практически отсутствует или не превышает 5 см, ко второму — породы с возможной просадкой от собственного веса более 5 см.

Возможность просадки от веса вышележащей толщи и ее величина определяются в полевых условиях путем опытного замачивания участка распространения лёссовых пород площадью не меньше мощности просадочной толщи.

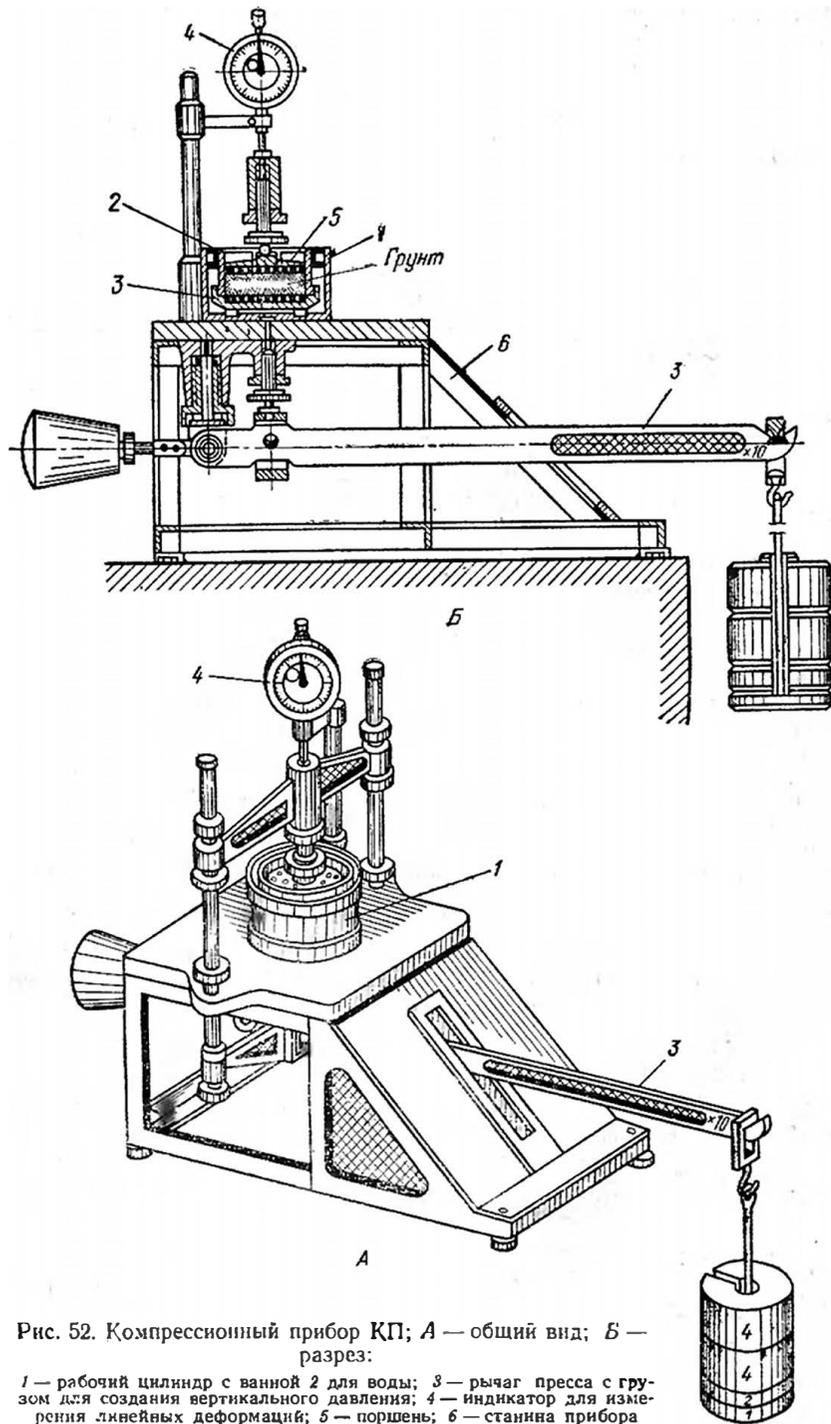


Рис. 52. Компрессионный прибор КП; А — общий вид; Б — разрез:

1 — рабочий цилиндр с ванной 2 для воды; 3 — рычаг пресса с грузом для создания вертикального давления; 4 — индикатор для измерения линейных деформаций; 5 — поршень; 6 — станина прибора

Основным показателем, характеризующим возможную величину просадочности по СНиПу, является *относительная просадочность*, которая определяется по формуле

$$\delta_{пр_i} = \frac{h - h'}{h_0},$$

где h_0 — высота образца породы природной влажности, обжатого давлением, равным природному $\sigma_{пр}$, без возможности бокового расширения, см; h — высота того же образца породы природной влажности, обжатого без возможности бокового расширения давлением σ_i , равным давлению от веса сооружения и собственного веса вышележащей породы ($\sigma_i = \sigma_{соор} + \sigma_{пр}$), см; h' — высота того же образца после пропуска через него воды при сохранении давления σ_i .

Для определения относительной просадочности при проектировании сооружений проводят поинтервально (послойно) компрессионные испытания всей толщи просадочных пород под сооружением по следующей схеме.

Испытуемый образец высотой h_0 помещают в компрессионный прибор, предохраняют его от высыхания и ступенями по 0,25—0,5 кг/см² доводят давление на него до величины σ_i , равной сумме проектируемого давления от сооружения и природного давления. Под этим давлением выдерживают образец до условной стабилизации осадки и определяют высоту образца h . Затем к образцу снизу проводят воду и, не изменяя давление, наблюдают за деформацией образца под влиянием замачивания. Вода для замачивания должна быть по химическому составу и общей минерализации аналогична воде, которая будет увлажнять породу в естественных условиях при строительстве и эксплуатации сооружения.

После завершения просадки от увлажнения определяют высоту образца h' . Далее опыт может продолжаться с целью определения сжимаемости лёссовой породы с нарушенными связями.

По данным опыта строят график (рис. 53) и рассчитывают относительную просадочность.

Величина возможной просадки всей толщи просадочной породы под сооружением вычисляется по формуле

$$S = \sum_1^n \delta_{пр_i} \cdot H_i m,$$



Рис. 53. Кривая компресси просадочной породы:

1 — участок осадки породы под нагрузкой, равной сумме природного давления и давления от сооружения; 2 — участок просадки после увлажнения; 3 — участок компресси породы после просадки

где $\delta_{пр}$ — относительная просадочность, определяемая для каждого слоя (интервала) просадочной породы; H_i — мощность каждого выделенного слоя (интервала), см; m — коэффициент условий работы основания, изменяющийся в пределах 1,5—2; n — число выделенных слоев в толще просадочной породы.

При большой мощности просадочная толща разбивается на отдельные слои с учетом литологического состава. При этом изменение суммарного давления в пределах выделенного слоя не должно превышать 1 кг/см^2 .

Для инженерно-геологического картирования относительная просадочность может определяться при стандартном давлении $\sigma = 3 \text{ кг/см}^2$.

Определение показателей деформационных свойств пород при трехосном сжатии с ограниченным боковым расширением. Компрессионные приборы, широко используемые в практике лабораторных исследований для определения сжимаемости пород при проектировании фундаментов и расчете возможных осадок сооружений, имеют ряд недостатков: 1) наличие трения между боковой поверхностью образца и стенками корпуса прибора; 2) невозможность точной подгонки поверхностей образца к соответствующим поверхностям цилиндра и горизонтальным прокладкам. Эти недостатки приводят очень часто к значительному завышению данных о деформации образца, и осадки сооружений, рассчитанные в лабораторных условиях, оказываются в несколько раз больше фактических.

Указанные недостатки в значительной мере устраняются при пользовании прибором, который называется *стабилометром*. С его помощью деформационные свойства пород изучаются при трехосном напряженном состоянии в условиях ограниченного бокового расширения. Иными словами, он позволяет моделировать процесс сжатия породы в условиях, приближающихся к условиям породы в основании сооружения. Кроме того, стабилометры позволяют производить комплексное определение всех показателей прочностных и деформационных свойств пород на одном образце для песчаных и на двух образцах для глинистых пород. Комплексные испытания в стабилометрах в значительной мере устраняют недостатки современных лабораторных исследований, заключающиеся в том, что показатели сопротивления сдвигу и сопротивлению сжатию определяются на значительном количестве образцов (до 10), на разных приборах и в различных условиях, в результате чего получают трудносоставимые показатели, искажающие оценку действительной прочности породы.

В настоящее время в СССР и за рубежом разработано большое количество разных моделей стабилометров. Ниже в качестве примера описана схема прибора конструкции Е. И. Медкова, модель М-2 (рис. 54).

Прибор Медкова предназначен для испытания образцов цилиндрической формы. Образец помещают в тонкую резиновую оболочку в камере прибора между пористыми дисками. Пространство между боковыми стенками камеры прибора и образцом в резино-

вой оболочке заполняют жидкостью (вода или смесь спирта с глицерином). Вертикальное давление на образец передается через поршень системой рычагов пресса, под который помещают прибор при испытаниях. Вертикальные деформации при сжатии измеряются индикаторами. Боковой распор в образце (боковое давление), возни-

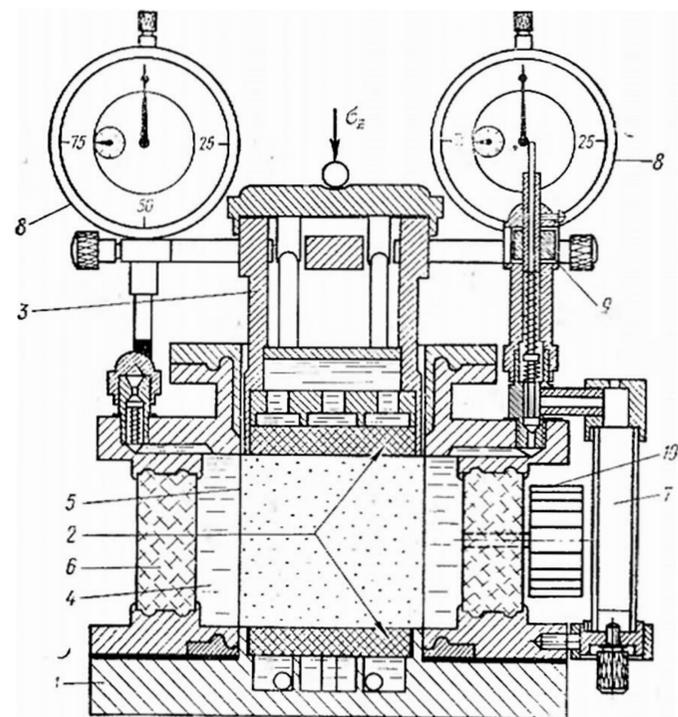


Рис. 54. Стабилометр М-2:

1 — основание (база) прибора; 2 — пористые диски; 3 — поршень для передачи на образец породы вертикального давления; 4 — полость прибора, заполненная жидкостью; 5 — изучаемый образец в резиновой оболочке; 6 — корпус прибора; 7 — валюмометр для измерения бокового расширения образца; 8 — индикаторы для измерения вертикальных деформаций образца; 9 — нажимная гайка с пружиной и клапаном для выпуска жидкости из полости прибора в валюмометр; 10 — манометр для измерения бокового давления

кающий под действием вертикальной нагрузки, передается на жидкость и замеряется манометром. Прибор позволяет испытывать образцы как в условиях, исключающих боковое расширение, так при разных условиях для бокового расширения. Возможность бокового расширения образца изучаемой породы регулируется специальным пружинным регулятором, с помощью которого выпускают жидкость из гидравлической камеры. Боковое расширение образца определяют по объему вытесненной жидкости измерительной стеклянной трубкой — валюмометром.

Испытания для определения показателей деформационных свойств производятся по следующей схеме. Как и в компрессионном приборе, на образец с помощью системы рычагов и поршня стабилометра передают ступенями вертикальное давление и наблюдают за уменьшением высоты образца по индикаторам и за боковым давлением по манометру. В результате наблюдений получают ряд данных о вертикальном давлении и соответствующих ему данных об уменьшении образца (при стабилизации осадки) и боковых давлениях:

$$\begin{aligned} \sigma'_b &= \Delta h_1 - \sigma'_6, \\ \sigma''_b &= \Delta h_2 - \sigma''_6, \\ \sigma'''_b &= \Delta h_3 - \sigma'''_6 \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

По этим данным и начальному коэффициенту пористости рассчитывают изменение коэффициента пористости и коэффициент пористости, как это было описано при характеристике компрессионных испытаний, и строят компрессионную кривую.

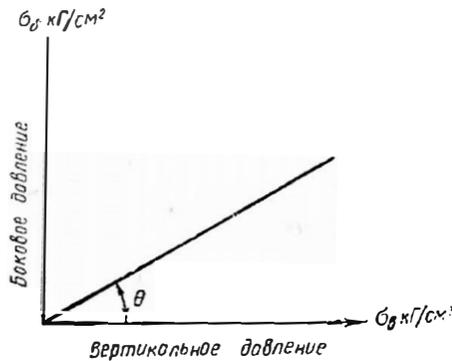


Рис. 55. График зависимости бокового давления от вертикального

По значениям вертикального и бокового давления строят график зависимости бокового давления от вертикального давления (диаграмма бокового распора, рис. 55). Тангенс угла наклона прямой на этом графике определяет коэффициенты бокового давления ξ . Вычислив их, можно подсчитать модуль общей деформации.

Стабилометр позволяет определять коэффициент Пуассона, модуль упругости, коэффициент фильтрации и показатели сопротивления сдвигу. Описание принципов определения последних дано в следующей главе, а коэффициента Пуассона, модуля упругости и коэффициента фильтрации — в практических руководствах по проведению опытов в стабилометре (см. дополнительную литературу).

Одноосное сжатие. Одноосное сжатие заключается в том, что образец изучаемой породы помещается под пресс и подвергается действию вертикального давления в условиях свободного расширения в стороны до момента разрушения. Опыт этот может проводиться как со скальными и полускальными породами, так и твердой, полутвердой, а также пластичной консистенции.

Для глинистых пород твердой и полутвердой консистенции поперечным расширением образца можно пренебречь, так как оно весьма невелико по размерам. В этом случае можно определить

временное сопротивление породы раздавливанию или прочность породы:

$$R_{сж} = \frac{P_{разр}}{F} \text{ кг/см}^2,$$

где $P_{разр}$ — общая нагрузка на образец в момент разрушения, кг; F — площадь поперечного сечения образца, см².

У пластичных глин поперечное сечение образца в процессе одноосного сжатия заметно увеличивается. В этом случае за момент разрушения породы принимают быстрое увеличение деформации, а поперечное сечение определяют с учетом бокового расширения образца.

В практике инженерно-геологических исследований одноосное сжатие применяется для оценки прочности скальных пород, для определения показателей сопротивления пород сдвигу, а также для характеристик влияния естественной структуры и прочности пород, т. е. для определения коэффициента структурной прочности.

Коэффициент структурной прочности ($K_{с.п}$) определяют по сопротивлению раздавливанию образца изучаемой породы с ненарушенной естественной структурой (R), а затем образца той же породы с нарушенной структурой ($R_{н.с}$), но при одинаковых пористости и влажности:

$$K_{с.п} = \frac{R}{R_{н.с}}$$

Для глинистых грунтов со слабыми структурными связями этот коэффициент равен 1 или несколько больше ее. Чем больше значение коэффициента структурной прочности, тем больше влияние структуры на прочность породы.

Полевые способы определения сжимаемости пород. В полевых условиях для определения сжимаемости пород на испытуемую породу в шурфе и скважине посредством штампа передают статическую нагрузку, постепенно возрастающую во времени. Под действием этой нагрузки порода испытывает три фазы деформации.

1. *Фаза уплотнения*, в процессе которой происходит деформация сжатия породы непосредственно под штампом в виде колонки. Окружающая колонка породы не подвергается деформации. Эта фаза характеризуется линейной зависимостью между нагрузкой и дефор-

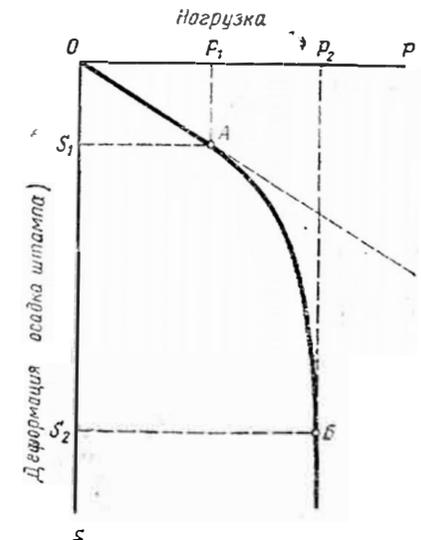


Рис. 56. Стадии деформации породы под нагрузкой штампом

мацией (отрезок OA на графике стадий деформации породы под нагрузкой, рис. 56).

2. *Фаза сдвига*, в процессе которой нарушается линейная зависимость между нагрузкой и деформацией. Приращение деформации опережает увеличение нагрузок, отдельные участки породы начинают сдвигаться относительно друг друга, наступает состояние предельного равновесия массива породы, окружающей сжимаемую колонку (отрезок AB на графике рис. 56).

3. *Стадия разрушения*, в процессе которой происходит резкое увеличение деформаций, разрушение породы в массиве, непосредственно окружающей сжимаемую колонку, и выпирание породы вверх. Нагрузка, соответствующая началу этого процесса, называется *пределом несущей способности*.

Для обеспечения устойчивости породы под сооружением его давление не должно превышать давления, отвечающего конечному периоду первой стадии деформаций, т. е. давления P_1 на графике (рис. 56). Это давление называется *предельным*, или *критической нагрузкой*, а внутреннее сопротивление породы сжатию, соответствующее этой нагрузке, — *несущей способностью*. Кроме критической нагрузки и несущей способности по результатам опытов определяют модуль общей деформации, который для прямолинейного участка графика $S=f(P)$ рассчитывается по формуле

$$E_0 = (1 - \mu^2) \frac{Q}{Sd} \text{ кг/см}^2,$$

где Q — полная нагрузка на штамп, кг ; S — конечная осадка штампа, отвечающая нагрузке Q , см ; d — диаметр штампа или круга, равновеликого площади штампа квадратного или прямоугольного сечения; μ — коэффициент поперечного расширения (коэффициент Пуассона), принимаемый для песков и супесей равным 0,30, для суглинков — 0,35 и для глин — 0,40.

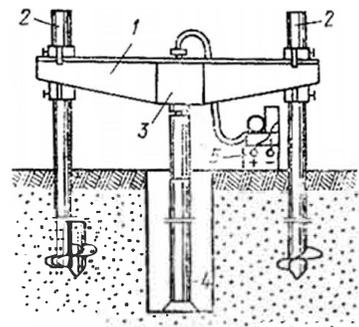


Рис. 57. Схема установки института строительства и архитектуры АН БССР для пробных нагрузок в скважинах:

1 — упорная балка; 2 — анкерные сваи; 3 — домкрат; 4 — опора штампа; 5 — насос со стабилизатором для создания и поддержания давления

Существует много конструкций установок для испытания пород пробными нагрузками в шурфах или скважинах. Основной деталью этих установок является штамп, с помощью которого на породу передается давление. В СССР принят стандартный штамп квадратной формы площадью 5000 см^2 для испытаний в шурфах. Для испытаний в скважинах применяется штамп площадью 600 см^2 . Штамп обычно представляет собой толстую стальную плиту, усиленную ребрами жесткости. Остальные детали установок служат для передачи давления на плиту (рис. 57 и 58).

32

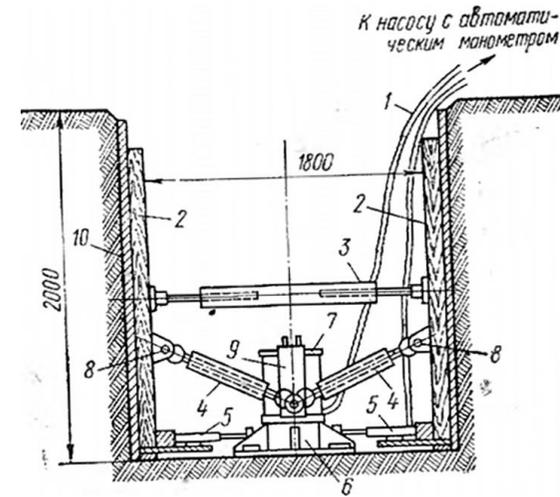


Рис. 58. Схема установки НИИОСП (конструкции И. Н. Круглова) для испытания пород пробными нагрузками в шурфах:

1 — маслопровод; 2 — опорные щиты; 3 — горизонтальные распоры; 4 — наклонные винтовые распоры; 5 — горизонтальные домкраты; 6 — штамп; 7 — опорная плита; 8 — упорные скобы; 9 — вертикальный домкрат; 10 — стенка шурфа

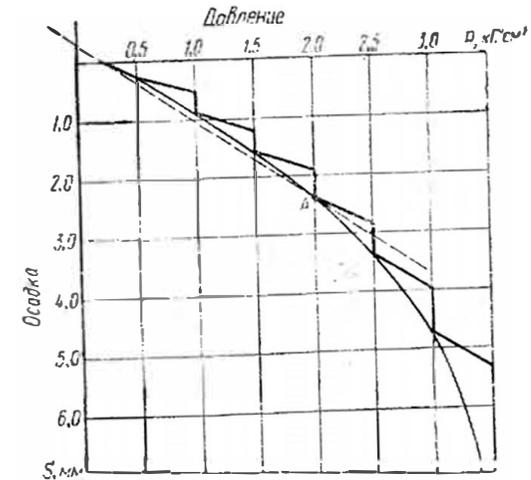


Рис. 59. График зависимости осадки штампа от давления

Для измерения осадок применяются специальные приборы: *прогибомеры и нивелиры*.

На штамп, установленный на необходимой глубине в шурфе или скважине, передается давление ступенями $0,25-0,5 \text{ кг/см}^2$, и производятся наблюдения за осадкой штампа. Давление увеличивается по мере затухания деформаций от предыдущей ступени. Общее давление доводится в слабых породах до разрушающего (третья фаза деформаций), а в плотных породах — до предельного (вторая фаза деформаций).

По наблюдениям за осадкой штампа строят график зависимости осадки штампа от времени. По результатам опытной нагрузки составляют график зависимости осадки от давления, при этом осадки штампа откладывают на период начала приложения данного давления и на период условной стабилизации при этом давлении. В силу этого график получается ступенчатым (рис. 59). Точка *A* на графике считается критической точкой перегиба, отделяющей начально-прямолинейный участок графика от участка, где зависимость между осадками и давлением выражается кривой.

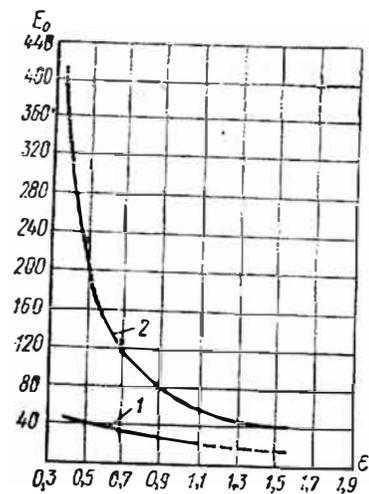


Рис. 60. График зависимости модуля общей деформации от коэффициента пористости:

1 — по данным лабораторных определений; 2 — по данным полевых опытных нагрузок

Следует отметить, что величины модуля общей деформации, определенные для одной и той же породы лабораторным способом и полевым, отличаются друг от друга. Модуль деформации, получаемый по данным лабораторных исследований, обычно значительно меньше значения модуля деформации, определяемого для той же породы по полевым опытным нагрузкам. Это хорошо видно по графику (рис. 60), составленному по исследованиям И. А. Агешева.

В последнее время для определения модуля деформации пород в скважинах стала применяться *прессиометрия*. Сущность этого способа заключается в том, что в буровую скважину на необходимую глубину опускают эластичную камеру, заполненную водой. После этого при помощи сжатого воздуха создают в этой камере давление и замеряют

деформации ее. Изменив несколько раз давление, получают ряд наблюдений за деформациями. По данным этих наблюдений рассчитывается модуль деформации.

Весьма перспективным для определения физических свойств прочности и деформационных свойств пород является также пене-трационно-каротажные методы, разрабатываемые Всесоюзным научно-исследовательским институтом гидрогеологии и инженерной геологии. Суть их заключается в изучении сопротивления проникно-

ванию в толщу породы зондов-датчиков, вдавливаемых специальными гидравлическими установками на глубину до 25 м. Одновременно с определением этого сопротивления производится комплекс модификаций радиоактивного каротажа. В результате получают непрерывную информацию о составе, свойствах и состоянии пород в виде диаграмм. Комплексная интерпретация этих данных позволяет получить необходимые расчетные данные для проектирования оснований сооружений без бурения скважин и лабораторных исследований образцов пород.

Контрольные вопросы

1. Характер деформаций и факторы, обуславливающие сжатие песчаных и глинистых пород.
2. В чем различие между компрессионным, одноосным сжатием и трехосным сжатием в условиях ограниченного бокового расширения?
3. Какая разница между модулем упругости твердого тела и модулем деформации пород?
4. Изложите схему проведения компрессионных испытаний и обработки результатов этих испытаний.
5. Что такое просадочность, в каких породах она наблюдается, как определяются показатели просадочности и где они используются?
6. Изложите схему проведения испытаний для определения деформационных свойств в стабилометре.
7. В чем состоит преимущество исследований деформационных свойств в стабилометре?
8. Методика проведения опыта по одноосному сжатию. Для каких целей проводятся эти опыты?
9. Изложите схему проведения полевых опытных нагрузок и обработки результатов.
10. Проанализируйте достоверность определения модуля общей деформации породы в лаборатории в приборах и по результатам опытных нагрузок в поле.
11. Изложите общие представления о прессиометрии и пенетрационно-каротажных исследованиях.

Литература

- Бондарик Г. К., Комаров И. С., Ферронский В. И. Полевые методы инженерно-геологических исследований. М., «Недра», 1967, гл. 4, § 1, 2; гл. 8.
- Приклонский В. А. Грунтоведение. М., Гос. науч.-техн. изд-во лит. по геологии и охране недр, 1955. Ч. 1, гл. 24, § 1—4; гл. 22, § 1—7.
- Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Знаиринов Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. V, § 3.
- Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М., «Недра», 1966, тема 10.

ГЛАВА 15
СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРОД СДВИГУ

Если положить какое-либо тело M на горизонтальную плоскость π (рис. 61, А), то оно будет действовать на эту плоскость с силой Q , равной весу этого тела. Вращая постепенно плоскость π вокруг некоторой точки A в вертикальном направлении, мы можем довести угол φ между плоскостью и горизонтом до величины, когда тело M придет в движение вниз по наклону. Тогда силу Q можно разложить на две составляющие в силу принципа независимости действия сил:

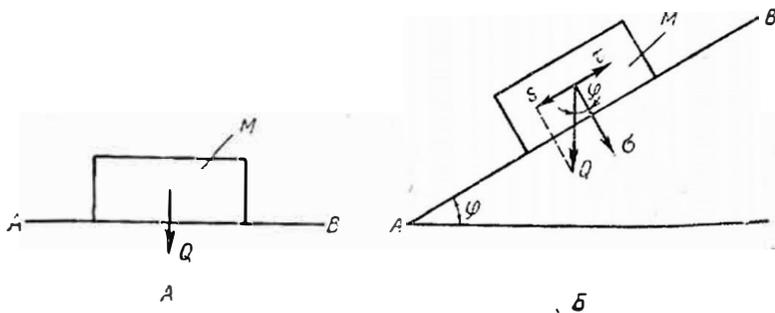


Рис. 61. Схема распределения сил при движении тел по наклонной плоскости

силу σ , прижимающую тело к плоскости, и силу S , параллельную этой плоскости и сдвигающую тело вниз по наклону (рис. 61, Б). Очевидно, что в момент нарушения равновесия сила S преодолевает силу τ , направленную в противоположную сторону и до определенного момента удерживавшую тело M на наклонной плоскости. Эту силу τ называют силой трения. Величина ее зависит от нормальной силы σ , прижимающей тело к наклонной плоскости. Чем больше σ , тем больше усилий нужно приложить для сдвига тела.

Отношение τ/σ называют *коэффициентом трения*, а угол φ — углом трения. Указанная терминология применяется и к явлениям трения в горных породах.

В горных породах сопротивление силам, стремящимся сдвинуть одну часть породы относительно другой, имеет более сложный характер и зависит прежде всего от класса породы.

В породах с жесткими связями между зернами сопротивление сдвигу зависит исключительно от прочности кристаллизационных

связей между зернами. В этих породах явление сдвига — скальвание — для инженерно-геологической практики значения не имеет. В скальных породах сила сопротивления сдвигу составляет около 5—10% от временного сопротивления на раздавливание. Для наиболее слабых разновидностей скальных пород она обычно равна 5—10 кГ/см^2 , а для крепких, прочных достигает нескольких десятков килограммов на квадратный сантиметр. Такое сопротивление сдвигу обеспечивает устойчивость сооружений, воздвигаемых на скальных породах, за исключением случаев, когда эти породы имеют прослой глины (например, прослой глины среди известняков или песчаников). В последнем случае сопротивление сдвигу массива породы будет обусловлено свойствами глины, которые и следует наиболее тщательно изучить.

Вследствие сложности явлений сдвига в песчаных и связных породах до сего времени не сложилось единого мнения на природу сопротивления этих пород сдвигу. По наиболее распространенной точке зрения сопротивление сдвигу пород без жестких связей объясняется двумя причинами: а) внутренним трением между отдельными частицами, слагающими породу, и б) сцеплением между частицами породы.

Причиной возникновения трения является шероховатость поверхности частиц. Сцепление зависит от водно-коллоидных связей, сил молекулярного притяжения между частицами и от естественных цементов, связывающих частицы.

Сопротивление сдвигу песчаных частиц в основном зависит от трения, возникающего при перемещении одних зерен относительно других, и сопротивления, связанного с раздроблением минеральных зерен.

В глинистых породах явление сдвига носит более сложный характер. Сопротивление сдвигу этих пород объясняется трением, возникающим при перемещении частиц, частичным дроблением этих частиц, сопротивлением водно-коллоидных связей, естественных цементов и сил молекулярного притяжения.

Значительное влияние на сопротивление сдвигу оказывает вода, особенно в глинистых породах. В качестве своеобразной смазки она снижает внутреннее трение между частицами и уменьшает силы сцепления.

Зависимость между усилием, необходимым для сдвига τ , и вертикальной нагрузкой σ выражается кривой линией. Однако кривизна ее в пределах нагрузок, обычно встречающихся при исследовании пород для строительных целей, настолько незначительна, что с точностью, достаточной для практики, эта зависимость принимается прямолинейной.

Сопротивление сдвигу песчаных пород. Проведем следующий опыт. В прибор, состоящий из двух поставленных друг на друга цилиндров, из которых нижний закреплен неподвижно (рис. 62, А), а верхний может свободно перемещаться в горизонтальной плоскости AB под действием горизонтального усилия, прилагаемого к нему через блок и систему рычагов, поместим образец песка. На песок

через поршень прибора передадим нормальное давление σ , а к боковой поверхности верхнего цилиндра приложим горизонтальное усилие S , которое будем постепенно увеличивать. При некотором значении силы S верхний цилиндр вместе с песком придет в движение вдоль плоскости AB (рис. 62, Б). В этот момент сила S будет несколько превышать силу τ , которая направлена в противоположную сторону и оказывает сопротивление сдвигу. Эта сила τ называется *силой трения*.

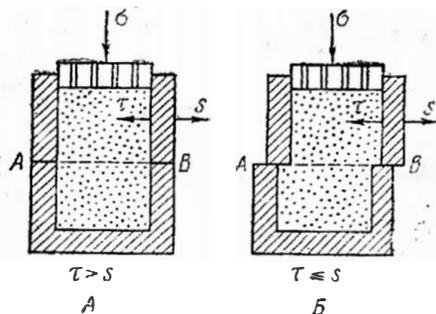


Рис. 62. Схема опыта на сдвиг

Если проделать такой опыт с несколькими образцами одного и того же песка при разных значениях нормальных давлений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и т. д., то мы получим соответствующие им значения S_1, S_2, S_3 , а следовательно, и значения силы трения τ_1, τ_2, τ_3 . По данным опытов построим график зависимости τ от σ . По оси абсцисс отложим величины σ , а по оси ординат — величины τ . Соединив экспериментальные точки,

получим линию, которая проходит через начало координат (рис. 63). образуемый этой линией с осью абсцисс угол φ называется *углом внутреннего трения*. Тангенс этого угла ($\operatorname{tg} \varphi = \frac{\tau}{\sigma} = f$) называется *коэффициентом внутреннего трения*.

Из предыдущего равенства получаем уравнение силы сопротивления сдвигу для песков: $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi$, или уравнение Кулона.

Опыты, проведенные с различными песками, показали, что угол и коэффициент внутреннего трения у разных по составу песков зависят от минералогического, гранулометрического состава и формы зерен. Наибольшее сопротивление сдвигу оказывают частицы остроугольной формы и пески, сложенные наиболее твердыми минералами. Влияние минералогического состава (твердость частиц) на угол внутреннего трения уменьшается от крупных фракций к мелким. В этом же направлении сказывается влияние гранулометрического состава: сопротивление сдвигу уменьшается по мере уменьшения размеров

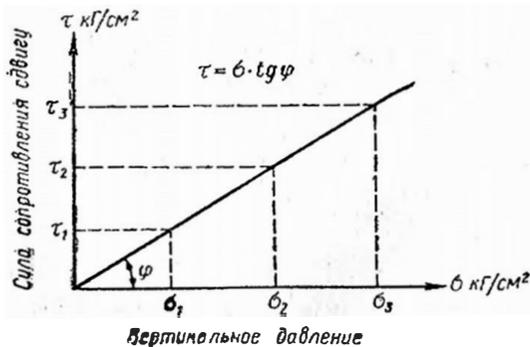


Рис. 63. График сопротивления сдвигу песчаной породы

частиц, слагающих пески. Влияние гранулометрического и минералогического состава на свойства песков детально изучал В. В. Охотин (табл. 45).

Таблица 45

Сопротивление сдвигу фракций различного минералогического состава

Размер частиц, мм	Угол внутреннего трения, град		
	слюда	остроугольный кварц	окатанный кварц
2—1	28	66	61
1—0,5	26	56	—
0,5—0,25	18	46	—
0,25—0,1	19	27	28
0,1—0,06	17	17	—

Для одного и того же по составу песка сопротивление сдвигу зависит от плотности сложения. Оно увеличивается с увеличением плотности сложения.

Следует отметить, что в плотном песке вследствие компактной укладки зерен существует так называемое *зацепление*: одни зерна входят в промежутки между другими. Для того чтобы произошел сдвиг в таком песке, необходимо приложить какое-то начальное усилие для того, чтобы раздвинуть зерна и приподнять их, т. е. произвести некоторое разрыхление песка. Это начальное усилие для сдвига песка называют *начальным сопротивлением структуры песка*. После преодоления начального сопротивления сила, которую необходимо затратить на сдвиг песка, уменьшается. Она теперь будет затрачиваться только на преодоление трения между частицами (рис. 64).

В рыхлом песке начальное сопротивление структуры практически не наблюдается.

Угол внутреннего трения рыхлых — сыпучих пород практически весьма близок углу естественного откоса, т. е. тому углу, который образует свободно насыпанный песок с горизонтальной поверхностью, или углу естественного косогора, сложенного обнаженными (незадернованными) несцементированными песками или другими несцементированными породами.

Влажность снижает сопротивление сдвигу мелкозернистых, глинистых песков, в крупнозернистых песках влияние влажности на сопротивление сдвигу практического значения не имеет.

В глинистых песках характер зависимости силы сдвига от влажности показан на рис. 65. Как видим из данных рисунка, сопротивление сдвигу достигает максимального значения при влажности порядка нескольких процентов. Дальнейшее увеличение влажности вызывает уменьшение сопротивления сдвигу. Эта закономерность может быть объяснена тем, что при небольшой влажности в песке появляется капиллярная связность. При большой влажности капил-

лярная связность исчезает и вода начинает играть роль смазки, уменьшающей трение между частицами. Минимального значения сопротивление песка сдвигу наблюдается при полном его водонасыщении.

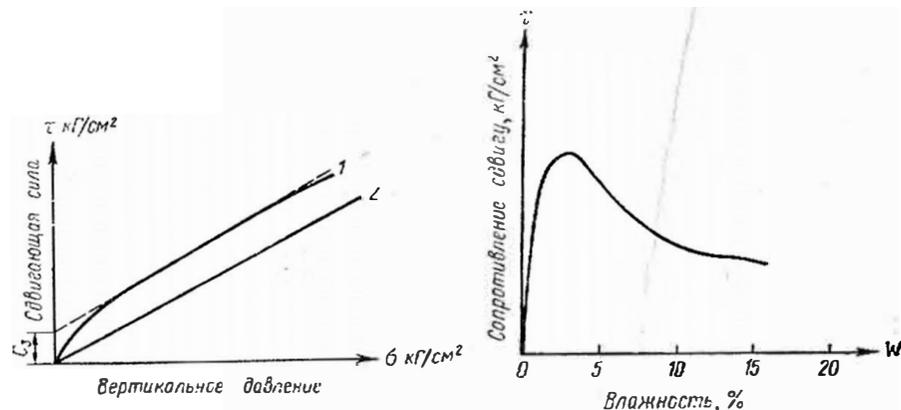


Рис. 64. Зависимость сопротивления песка сдвигу от плотности сложения (по М. И. Гольдштейну):

1 — плотный песок; 2 — рыхлый песок; C_3 — начальное сопротивление структуры песка

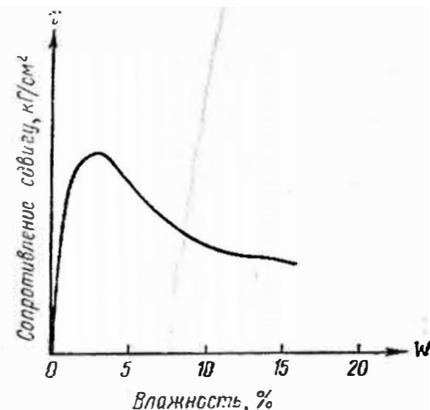


Рис. 65. График зависимости сопротивления сдвигу от влажности песка

Сопротивление сдвигу глинистых пород. Если с глинами проделать те же опыты, что и с песками, т. е. определить срезающее усилие в зависимости от нормального давления, и построить по полученным данным график зависимости τ от σ , то получим следующую картину (рис. 66).

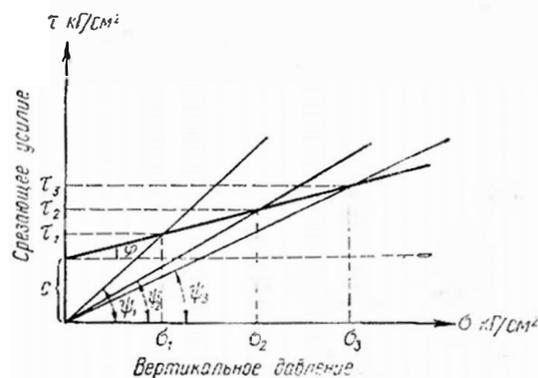


Рис. 66. График сопротивления сдвигу связной (глинистой) породы

Зависимость τ от σ выражается почти прямой линией. Криволинейный участок наблюдается при малых значениях σ . Прямая линия отсекает на оси ординат некоторый отрезок, который показывает, что даже при отсутствии нормального давления ($\sigma=0$) тре-

буется определенное срезающее усилие для того, чтобы произвести срез, т. е. срезу при $\sigma=0$ оказывает сопротивление какая-то иная сила, а не сила трения. Этой силой в глинистых породах является сцепление C . Поэтому уравнение сопротивления сдвигу для глины имеет вид

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C.$$

Это уравнение отражает закон Кулона в применении к глинистым породам и показывает, что сопротивление сдвигу этих пород зависит от нормального давления и сил сцепления. Угол φ здесь также является углом внутреннего трения (на графике он образуется экспериментальной линией и осью абсцисс), а тангенс этого угла — коэффициентом внутреннего трения.

Если соединить каждую отдельную экспериментальную точку с началом координат, получим прямые линии, угол наклона которых к оси абсцисс называется *углом сдвига* ψ , а тангенс этого угла — *коэффициентом сдвига*:

$$\operatorname{tg} \psi = F.$$

Последние два показателя характеризуют общее сопротивление сдвигу глинистой породы при данном ее физическом состоянии и при данном нормальном давлении.

Единого взгляда на природу сопротивления сдвигу глинистых пород не существует. Одни исследователи считают, что сопротивление сдвигу обусловлено только силами сцепления, другие ставят его в зависимость как от сил трения, так и сцепления. Вторая точка зрения представляется более отвечающей природе сдвига, так как доказано, что срезающее усилие в глинистых породах зависит от нормальной нагрузки и увеличивается при ее росте. Нормальная нагрузка, как это было показано ранее, прямо влияет на трение. Ее увеличение усиливает трение. Это связано с тем, что нормальная нагрузка сближает частицы между собой, прижимает их друг к другу и тем самым увеличивает трение. В то же время сопротивление сдвигу глинистых пород тем больше, чем больше их связность, силы связи между частицами (водно-коллоидные, кристаллизационные, цементация), т. е. определяется также силами сцепления.

Многочисленные исследования природы сдвига показали, что сопротивление глинистых пород сдвигу зависит от целого ряда факторов: от физического состояния глинистой породы (пористости и влажности), минералогического и гранулометрического состава, структуры и текстуры, состава и концентрации водного раствора в порах.

При одном и том же составе глины сопротивление сдвигу уменьшается при ее увлажнении. Вода играет роль смазки. Кроме того, при увлажнении происходит увеличение объема глины — набухание; глинистые частицы раздвигаются, пленки воды, удерживаемые на поверхности частиц, сглаживают их шероховатость и, следовательно, уменьшают трение между ними (рис. 67).

Плотность — пористость также определяет сопротивление сдвигу глинистых пород. Чем больше плотность, а следовательно мень-

ше пористость, тем больше частицы породы сближены друг с другом и, следовательно, тем большее трение возникает между ними при сдвиге (рис. 68).

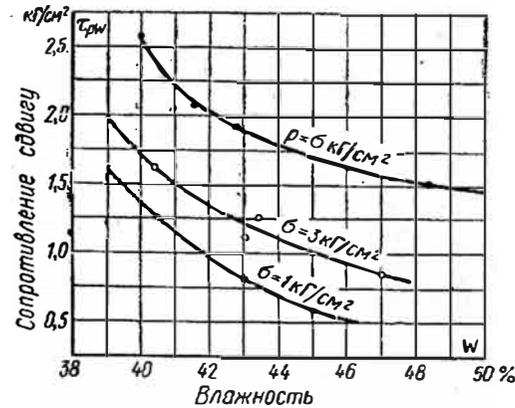


Рис. 67. График зависимости сопротивления сдвигу глинистой породы от ее влажности при разных вертикальных давлениях

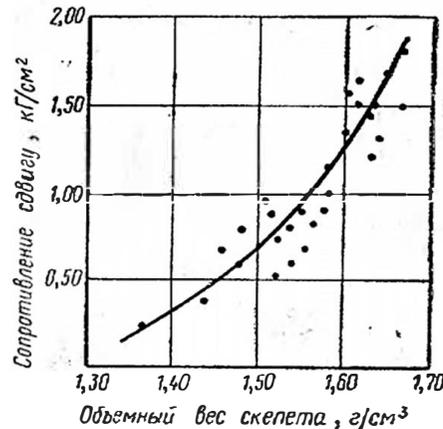


Рис. 68. График зависимости сопротивления сдвигу глинистой породы от ее плотности (объемного веса)

Выщелачивание солей из засоленных глинистых пород также приводит к снижению сопротивления сдвигу.

В тонкослоистых глинистых породах, например ленточных глинах, сопротивление сдвигу изменяется в зависимости от направления сдвигающей силы по отношению к слоистости породы. Сопротивление сдвигу по направлению слоистости в таких породах, как

Нарушение структуры в значительной степени уменьшает сопротивление сдвигу. При разрушении структуры глинистой породы уменьшается в несколько раз связность породы, а следовательно, и ее часть сопротивления сдвигу, которая обусловлена сцеплением. При большом увлажнении глинистой породы с нарушенной структурой (глинистая паста) она может переходить в текучее состояние. В таком случае полностью исчезают силы сцепления и сопротивление трения такой породы приближается к нулю.

Сопротивление сдвигу глинистых пород уменьшается при увеличении содержания в глинах гидрофильных минералов. Наименьшим сопротивлением при прочих равных условиях характеризуются монтмориллонитовые глины, наибольшим — глины со значительным содержанием кварца и каолинита.

Увеличение дисперсности глин, т. е. уменьшение размера частиц, так же как и в песках, уменьшает сопротивление породы сдвигу.

правило, меньше, чем в направлении, перпендикулярном слоистости. Такой же анизотропностью в отношении сопротивления сдвигу характеризуются лёссы и глинистые сланцы. Сильно снижает сопротивление сдвигу микротрещиноватость глин.

Значительное влияние на сопротивление сдвигу оказывают химический состав и концентрация растворенных веществ в воде, насыщающей поры породы. Наличие растворенного натрия снижает сопротивление сдвигу, кальция — повышает. Это объясняется тем, что натрий, переходя в поглощенное состояние, обуславливает образование вокруг глинистых частиц толстых пленок воды, связанных в диффузном слое и снижающих сопротивление породы сдвигу. Поглощенный кальций образует менее толстые гидратные оболочки, а поэтому по сравнению с натрием обуславливает большее сопротивление сдвигу.

В этом же направлении оказывает влияние концентрация растворенных солей в воде, насыщающей поры глин. При большой концентрации солей гидратные оболочки тоньше, поэтому сопротивление сдвигу глин, содержащих концентрированный поровый раствор, оказывается выше сопротивления сдвигу глин с менее концентрированным поровым раствором.

На экспериментальные данные о величине сопротивления сдвигу пород влияют условия проведения опыта: скорость нарастания срезающего усилия и характер предварительной подготовки образцов к проведению испытания.

Показатели сопротивления пород сдвигающим усилиям — угол и коэффициенты внутреннего трения, сцепление, угол и коэффициент сдвига — определяют в лабораторных и полевых условиях.

Лабораторные методы определения сопротивления сдвигу. Лабораторные методы по способу определения показателей сопротивления пород сдвигу делятся на три группы: 1) определение сопротивления пород сдвигу путем прямого среза образцов; 2) определение сопротивления сдвигу в условиях одноосного напряженного состояния; 3) определение сопротивления сдвигу в условиях трехосного напряженного состояния.

Определение показателей сопротивления пород сдвигу путем прямого среза образцов производится в специальных срезных приборах по фиксированным плоскостям среза. Существуют двухплоскостные и одноплоскостные срезные приборы. Наибольшее распространение получили вторые, как наиболее приближающие условия опыта к деформациям сдвига грунта под сооружением, в откосах и т. д. Среди таких приборов следует отметить сдвиговой прибор Маслова — Лурье в модернизации Гидропроекта (ГПП-30) (рис. 69, см. вкл.). Он используется для испытаний песчаных и глинистых пород с естественной и нарушенной структурой. Для предварительного уплотнения испытуемых образцов в комплект прибора входят ванны уплотнители (ГПП-29).

Конструкция прибора ГПП-30 позволяет производить сдвиг путем непосредственного приложения к образцу внешнего сдвигающего усилия или путем наклона срезающего устройства с нагру-

женным образцом. Последний способ применим для пород, обладающих малым сопротивлением сдвигу.

Испытуемый образец закладывается в кольца разъемной обоймы срезывателя прибора (рис. 70), который помещается на подвижной панели прибора. Сдвигающее усилие передается на верхнюю обойму срезывателя при помощи специального коромысла с тягой. Вертикальное давление на образец передается через штамп механизмом, состоящим из системы рычагов с тягой (см. рис. 69).

Срез производится при нескольких вертикальных нагрузках и 2—3 образцов под каждой вертикальной нагрузкой.

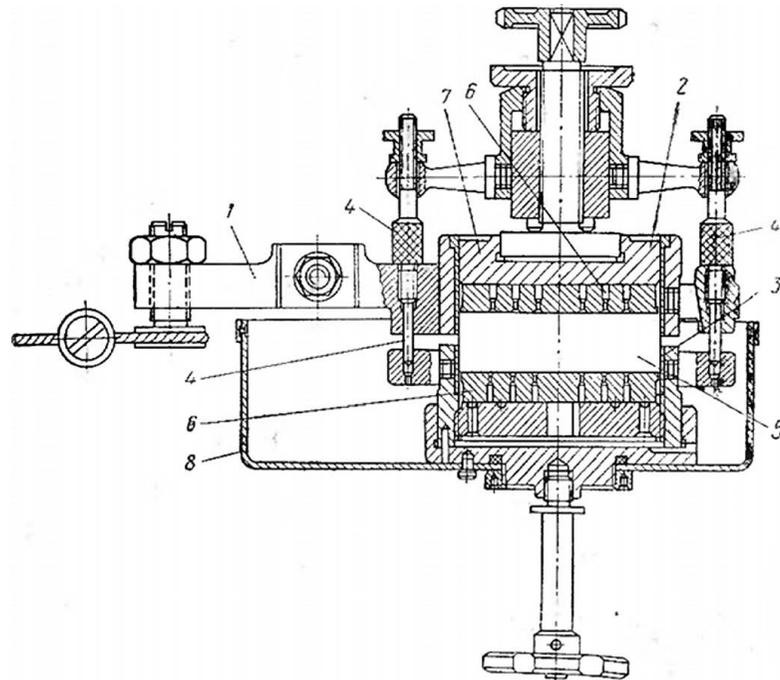


Рис. 70. Срезыватель прибора ГП-30:

1 — тяга горизонтального усилия; 2 — верхняя подвижная и 3 — нижняя неподвижная обоймы для образца породы; 4 — установочные винты для создания зазоров между обоймами; 5 — образец; 6 — пористые вкладыши; 7 — поршень для передачи вертикального давления на образец; 8 — ванна прибора, заполняемая водой

Большое влияние на результаты опытов оказывает предварительная подготовка образцов к опыту и ход самого опыта. При подготовке к испытаниям образцов с ненарушенной структурой особое внимание обращается на сохранение естественной структуры и влажности.

Недостаток этого способа определения показателей сопротивления сдвигу состоит в несоответствии напряженного состояния образцов породы в приборе и поверхности их среза тем, которые возникают при разрушении породы в условиях трехосного сжатия, на-

блюдаемого в основании сооружений. Тем не менее он получил широкое распространение в практике благодаря своей простоте и близкому совпадению получаемых данных для некоторых типов пород с результатами, получаемыми другими, более совершенными методами.

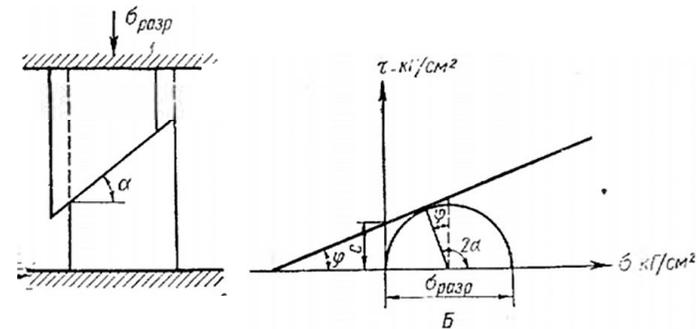


Рис. 71. Схема определения показателей сопротивления сдвигу при одноосном сжатии:

А — схема опыта на одноосное сжатие; Б — диаграмма прочности пород по данным опыта

Определение показателей сопротивления сдвигу в условиях одноосного напряженного состояния производится путем одноосного сжатия при отсутствии бокового давления. По этому способу цилиндрический образец изучаемой породы помещают под пресс прибора одноосного сжатия и, последовательно увеличивая нагрузку, доводят образец до разрушения (рис. 71, А). Фиксируется разрушающая нагрузка $\sigma_{\text{разр}}$ и угол скола α . По полученным величинам определяют угол внутреннего трения и сцепление по формулам:

$$\varphi = 2\alpha - 90^\circ;$$

$$C = \frac{\sigma_{\text{разр}}}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{\sigma}{2 \operatorname{tg} \alpha \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)}$$

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi.$$

Указанные формулы вытекают из диаграммы прочности. Для построения диаграммы прочности по оси абсцисс откладывают значение разрушающей нагрузки $\sigma_{\text{разр}}$ (рис. 71, Б), на отрезке оси ординат, равном этой нагрузке, используя его как диаметр, проводят окружность (круг Мора), из центра окружности проводят радиус под углом, равным 2α , к оси абсцисс. К точке пересечения радиуса с окружностью проводят касательную или так называемую предельную огибающую. Значения φ , C и τ могут быть определены графически, как это показано на рис. 71, Б.

Указанный способ применим к глинистым породам с хрупким характером деформации разрушения. При пластичном характере

деформации породы угол внутреннего трения принимается равным 0 ввиду незначительной его величины, и тогда

$$C = \frac{\sigma_{\text{разр}}}{2}$$

Недостаток описанного способа заключается в том, что он применим только для небольших давлений σ . При больших значениях давлений указанные выше закономерности нарушаются, в связи с тем что огибающая в области больших давлений имеет меньший наклон. В этих случаях показатели сопротивления сдвигу следует определять на срезных приборах или приборах трехосного сжатия.

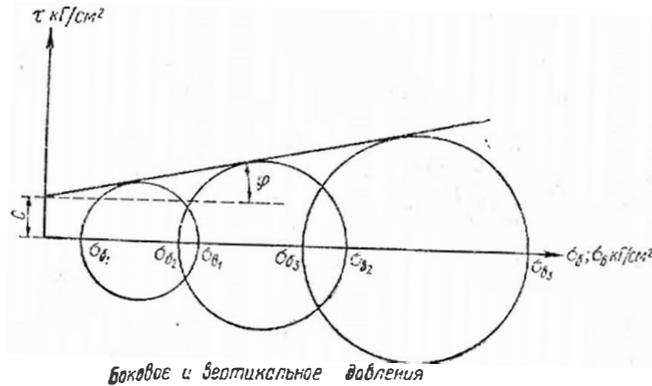


Рис. 72. Диаграмма прочности по данным трехосного сжатия

Определение показателей сопротивления пород сдвигу при трехосном напряженном состоянии производится в специальных приборах — стабилометрах. Описание одной из моделей таких приборов дано в гл. 14.

Сущность этого способа заключается в раздавливании нескольких образцов данной породы в стабилометре при различных значениях вертикального и бокового давлений. На основе этих данных строятся круги Мора — диаграмма прочности, как показано на рис. 72. Пользуясь этой диаграммой, определяют угол внутреннего трения φ как угол наклона касательной к кругам (огibaющей) и сцепление C , равное отрезку, отсекаемому на оси τ продолжением касательной.

Этот метод является более совершенным, так как условия опыта по разрушению образца в приборе больше приближаются к условиям разрушения пород в основаниях сооружений.

К недостаткам этого способа относится известная сложность испытания образцов и необходимость многократного повторения опыта на нескольких образцах. Последний недостаток устраняется при пользовании методикой, разработанной проф. Е. И. Медковым.

Схема проведения опытов по предложенной им методике излагается ниже.

Для определения показателей сопротивления сдвигу песчаных пород описанным способом используют данные наблюдений, получаемые при опытах на сжатие песчаной породы в стабилометре. Как уже было сказано, в результате этих опытов получают ряд значений нормальных сжимающих напряжений σ_v и соответствующих им боковых давлений σ_b .

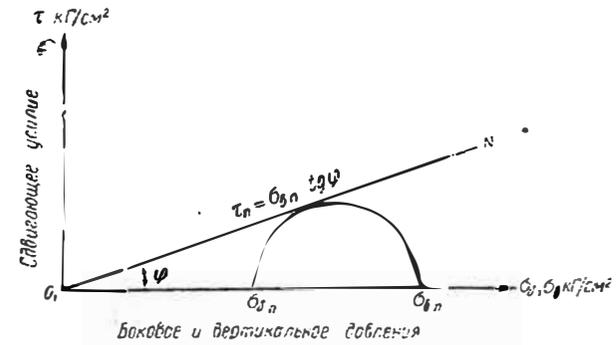


Рис. 73. Диаграмма прочности песчаной породы

По полученным значениям вертикального давления и соответствующим им значениям бокового давления строят круг Мора (рис. 73) и из начала координат проводят касательную огibaющую O_1N . Угол внутреннего трения φ определяется как угол наклона огibaющей O_1N к горизонтальной оси.

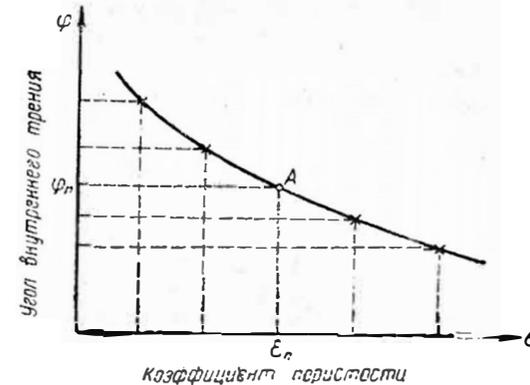


Рис. 74. График зависимости угла внутреннего трения от коэффициента пористости песка

Поскольку угол внутреннего трения песчаных пород в большой степени зависит от их плотности, целесообразно определять угол внутреннего трения для данного песка при разных значениях коэффициента пористости образца, заложенного в прибор. Результаты этих опытов выражаются в виде графика $\varphi = f(\epsilon)$, который имеет

вид, аналогичный представленному на рис. 74. При наличии такого графика можно найти значение угла внутреннего трения для любого заданного значения коэффициента пористости.

Определение показателей сопротивления сдвигу глинистых пород производится в стабилометре в комплексе с определением ряда других показателей механических свойств (см. гл. 14). Как и в предыдущем случае, показатели сопротивления сдвигу определяются

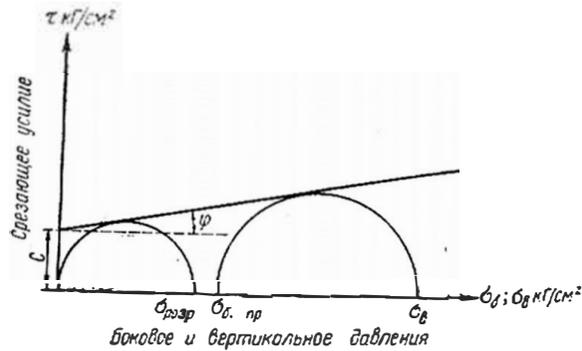


Рис. 75. Пример определения сцепления и угла внутреннего трения по данным опытов в стабилометре (по Медкову Е. И.)

с помощью диаграммы предельного равновесия Мора. При этом строятся два круга Мора. Первый круг строится диаметром, равным $\sigma_{разр}$ (предел структурной прочности по Медкову). Для этого производится испытание на одноосное сжатие при $\sigma_в = 0$. Второй круг строится диаметром, равным разности $\sigma_в - \sigma_{б. пр}$. $\sigma_{б. пр}$ определяется при разрушении образца (полутвердые и твердые глины) или переводе его в текучепластичное состояние (пластичные глины) путем уменьшения бокового давления при неизменном вертикальном давлении. К полученным кругам Мора проводится касательная — огибающая. Отрезок, отсекаемый огибающей на оси ординат (рис. 75), равен сцеплению, а угол, образуемый огибающей с горизонтальной осью, есть угол внутреннего трения.

Условия проведения работ по определению показателей сопротивления пород сдвигу в лабораторных условиях должны максимально моделировать напряженное состояние породы под сооружением. Выбор методики определения этих показателей должен производиться с учетом текстуры — структурных особенностей породы и условий взаимодействия с сооружением. Для глинистых пород с прочными крепкими структурными связями следует производить опыт при одноосном или трехосном напряженном состоянии. При предполагаемой возможности выпирания породы из-под подошвы фундамента сооружения рекомендуется производить испытания в условиях трехосного напряженного состояния.

Одноплоскостной прямой срез можно рекомендовать для испытания слоистых пород с ослабленными связями по плоскостям напластования, по которым может произойти действительный плоский сдвиг под воздействием сооружения.

В зависимости от характера предварительной подготовки образцов к опыту в приборах прямого среза различают три вида среза.

1. **Срез нормально уплотненных образцов.** Образцы испытываемой породы перед срезом предварительно уплотняются различными вертикальными нагрузками до полной консолидации — завершения уплотнения под данной нагрузкой. Срез каждого уплотненного образца производится при вертикальной нагрузке, равной той, под которой он предварительно уплотнялся, т. е. σ при срезе равна $\sigma_{пр.упл}$. Обычно срезается шесть или девять образцов под тремя различными нагрузками (1, 3, 5 или 2, 4, 6 кг/см²).

2. **Срез переуплотненных образцов.** Испытуемые образцы уплотняются разными вертикальными нагрузками до процесса консолидации, а срезаются без вертикальной нагрузки или при меньших нагрузках, т. е. σ при срезе $< \sigma_{пр.упл}$.

3. **Срез недоуплотненных образцов.** Предварительно образцы не уплотняются или уплотняются в продолжение короткого времени, в течение которого не наступает полная консолидация; срез производится при различных вертикальных нагрузках, т. е. σ при срезе $> \sigma_{пр.упл}$.

Сопротивление сдвигу в условиях завершеного уплотнения (сдвиг нормально уплотненных образцов) представляет собой наибольшую величину, которая характеризует возможное сопротивление пород сдвигу к концу строительного периода, когда наступает полная консолидация пород. Таким же сопротивлением обладает порода твердой консистенции в природной обстановке.

Сопротивление сдвигу в условиях незавершенного уплотнения (сдвиг недоуплотненных образцов) характеризует возможное сопротивление сдвигу пород в начальный период строительства, когда на породу передана не вся проектируемая нагрузка, т. е. когда к концу строительного периода не ожидается полная консолидация пород в основании сооружения.

Для определения сопротивления сдвигу, вызываемому сцеплением при разных вертикальных нагрузках, сдвиг переуплотненных образцов, по предложению Ф. П. Саваренского, производится параллельно со сдвигом нормально уплотненных образцов.

Полевые способы определения сопротивления сдвигу. Из полевых способов определения сопротивления пород сдвигу можно указать следующие: а) срез монолита породы в большом срезном приборе; б) срез целиков породы; в) изучение сопротивления сдвигу путем раздавливания целиков породы; г) изучение сопротивления сдвигу прибором вращательного среза («крыльчаткой»).

Срез монолита породы в большом срезном приборе. Опыт в принципе почти не отличается от лабораторного опыта — прямого среза по фиксированной плоскости среза. Отличие состоит в том, что в полевых условиях имеется возможность подвергнуть испытанию

больший по размеру образец, а это очень важно для однородных неслоистых песчано-глинистых пород, содержащих мелкие включения, испытание которых в лабораторных приборах практически невозможно.

Для проведения этого опыта предложен ряд приборов.

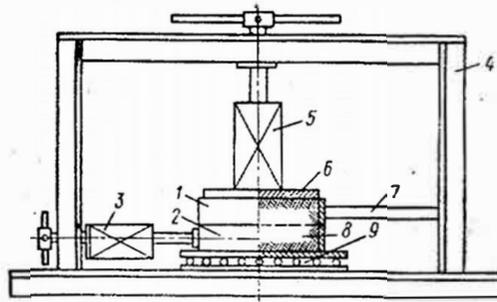


Рис. 76. Схема прибора для полевых испытаний пород на срез (конструкции Днепропетровского института инженеров транспорта):

1 — верхняя неподвижная обойма; 2 — нижняя подвижная обойма; 3 — горизонтальный домкрат с динамометром; 4 — упорная силовая рама; 5 — вертикальный домкрат с динамометром; 6 — штамп; 7 — упор для неподвижной обоймы; 8 — монолитный образец породы; 9 — основание прибора с шариками

описанного выше. В горной выработке или на обнажении оставляются большие целики породы, которые по размерам и форме подгоняют к обойме полевого прибора. Обойму надевают на целик и через поршень и обойму передают вертикальную и горизонтальную нагрузки на него. Целики одной и той же породы срезаются при различных вертикальных давлениях. Простейшая схема такого прибора приведена на рис. 77.

Изучение сопротивления сдвигу путем раздавливания целиков породы. Метод применяется для испытания глинистых пород, содержащих щебень. В массиве испытываемой породы вырезают призму квадратного сечения и разрушают ее вертикальной нагрузкой в условиях свободного бокового расширения. Сторона квадрата должна быть не менее 0,4 м и в 5—6 раз превы-

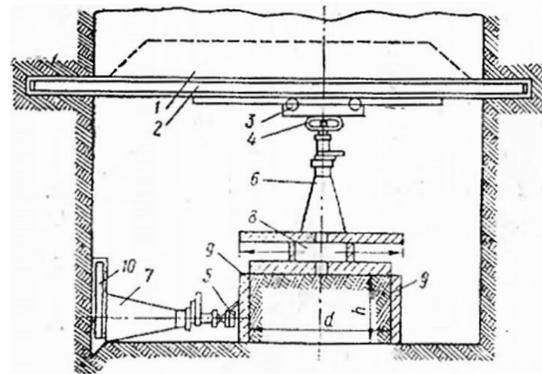


Рис. 77. Схема прибора для проведения испытаний целика породы на сдвиг:

1 — груз; 2 — упорная балка; 3 — тележка; 4, 5 — динамометры; 6, 7 — домкраты; 8 — штамп; 9 — обоймы; 10 — упорная плита

Схема одного из них — прибора для полевых испытаний на срез конструкции Днепропетровского института инженеров транспорта (ДИИТ) — помещена на рис. 76.

Ход опыта и обработка результатов испытаний аналогична испытанию в срезном приборе в лабораторных условиях.

Срез целиков породы.

Схема этого способа определения сопротивления пород сдвигу в полевых условиях ничем не отличается от среза монолита,

шарь размер наиболее крупных включений, отношение высоты призмы раздавливаемой породы к ее ширине должно быть не менее 1,5. Нагрузка на призму передается ступенями постепенно до разрушения призмы. Для получения более достоверных значений

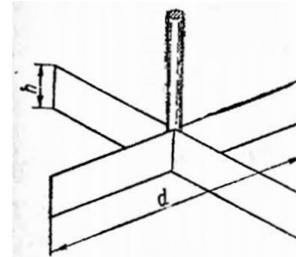


Рис. 78. «Крыльчатка» — для вращательного среза

показателей сдвига обычно проводят несколько опытов и подсчитывают средние значения угла внутреннего трения и сцепления.

Сопротивление сдвигу вычисляют по формуле

$$\tau = \frac{Q}{F},$$

где Q — максимальная вертикальная нагрузка, при которой произошло разрушение, кг; F — площадь призмы, см².

При пластическом типе разрушения призмы принимается, что угол внутреннего трения равен 0, а сила сцепления $C = \tau$.

При разрушении глин твердой и полутвердой консистенции происходит расщепление призмы, образование плоскостей скольжения. При правильной подготовке верхней плоскости призмы (должна быть строго выдержана параллельность этих плоскостей) трещины пересекают целик по диагонали. Замеряют угол α между горизонтальной плоскостью и трещинами, образовавшимися при раздавливании призмы. Показатели сдвига вычисляют по формулам:

$$\varphi = 2\alpha - 90^\circ,$$

$$C = \frac{Q}{2F \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)}$$

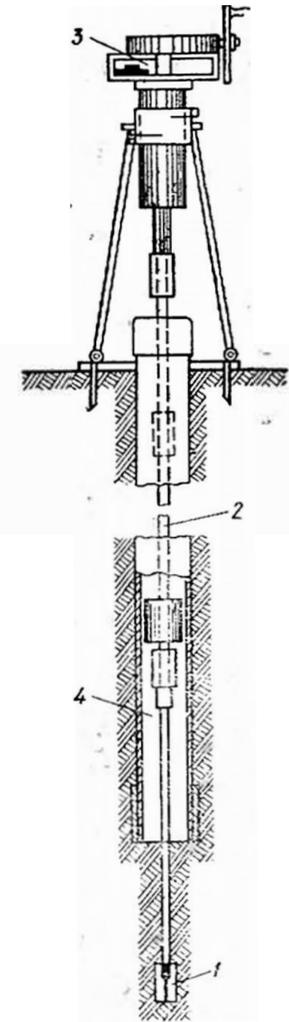


Рис. 79. Общая схема установки для вращательного среза породы в скважине:

1 — «крыльчатка»; 2 — штанги; 3 — операторский столик; 4 — скважина, закрепленная обсадными трубами

Изучение сопротивления сдвигу прибором вращательного среза — крыльчаткой. Этим способом можно определять сопротивление пород сдвигу в скважинах на глубину до 20 м. Он применим для испытания слабых однородных пород, не содержащих крупных включений: илов, пластичных глин, современных аллювиальных отложений (суглинков, супесей). Испытания производят с помощью крыльчатого зонда, состоящего из двух или четырех режущих лопастей, изготавливаемых из прочной листовой стали (рис. 78). Зонд вдавливают с помощью штанг в испытываемую породу на глубину не менее 0,3—0,5 м ниже забоя скважины (рис. 79). Затем крыльчатку поворачивают и замеряют крутящий момент M . Поворот крыльчаток вызывает срез определенного объема породы, имеющего форму цилиндра. Сопротивление сдвигу рассчитывается по формуле

$$\tau = \frac{M}{1,57d^2 \left(h + \frac{d}{3} \right)} \text{ кг/см}^2,$$

где M — крутящий момент, кг/см ; d — диаметр цилиндра вращения, равного двойной длине лопасти, см ; h — высота цилиндра вращения (высота лопасти), см .

Испытания повторяют несколько раз через 1 м по глубине скважины.

В настоящее время разработаны новые конструкции зондов крыльчаток, позволяющие проводить вращательный срез в скважинах с созданием нормального давления. Испытания ведут в одной скважине в пределах изучаемого слоя через каждые 0,3—0,5 м. Такой способ испытаний позволяет определять не только силу сопротивления сдвигу τ , но и устанавливать зависимость ее от нормального давления и определять угол внутреннего трения и сцепление.

Контрольные вопросы

1. Природа трения и сцепления в несцементированных горных породах.
2. Какие факторы определяют сопротивление сдвигу в песчаных грунтах и какими показателями оно характеризуется?
3. Какие факторы определяют сопротивление сдвигу глинистых пород и какие показатели его характеризуют?
4. Что такое начальное сопротивление структуры песка и как оно определяется?
5. Лабораторные способы определения показателей сдвига песчаных пород.
6. Лабораторные способы определения показателей сопротивления сдвигу глинистых пород.
7. Основные способы подготовки образцов глинистых пород к опытам на срез. Как они влияют на результаты опытов?
8. Основные способы определения сопротивления сдвигу путем среза монолитов в полевых условиях. В чем заключается их преимущество по сравнению с аналогичными опытами в лабораторной обстановке?

9. Как определяются показатели сопротивления сдвигу в полевых условиях способом раздавливания монолитов?

10. Определение сопротивления пород сдвигу способом крыльчатого зондирования. Для каких пород применим этот способ?

Литература

- Бондарик Г. К., Комаров И. С., Ферронский В. И. Полевые методы инженерно-геологических исследований. М., «Недра», 1967, гл. 4, § 3.
- Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Т. 2. Под ред. Е. М. Сергеева, С. И. Максимова, Г. М. Березкиной. М., Изд-во МГУ, 1968, гл. 36.
- Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. V, § 5.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ГРУПП ПОРОД И ПОЧВ КАК ГРУНТОВ

Горные породы и почвы в рассмотренной в гл. 1 классификации подразделяются на два класса — породы с жесткими связями (класс А) и породы без жестких связей (класс Б), которые характеризуются принципиально отличными друг от друга физико-техническими свойствами.

Породы с жесткими связями, как уже неоднократно говорилось и как явствует из самого названия их, обладают прочными связями между зернами составляющих их минералов. Это твердые компактные или, как принято их называть в строительной практике, скальные и полускальные породы. Под действием внешних нагрузок от сооружений они ведут себя как твердые упругие тела, практически несжимаемые. При нарушении связи не восстанавливаются. В невыветрелом состоянии эти породы способны выдерживать нагрузки от любых сооружений.

Класс пород с жесткими связями объединяет группы магматических, метаморфических и осадочных сцементированных горных пород.

Класс пород без жестких связей объединяет группу осадочных несцементированных пород, почвы и искусственные грунты, которые отличаются сложными по своей природе связями или их полным отсутствием (сыпучие породы). Они характеризуются большой изменчивостью своих свойств в зависимости от состава, степени влажности, плотности и нарушенности естественного сложения.

Краткая характеристика пород класса А (твердых — скальных)

Группа магматических пород. Эти породы являются продуктом остывания и кристаллизации магматических масс. Минералогический состав их, структуру, текстуру и прочность определяют условия застывания магмы и ее химический состав.

По условиям застывания магматические породы подразделяют на глубинные — интрузивные, застывшие на значительных глубинах от поверхности Земли, и излившиеся — эффузивные, застывшие на поверхности Земли.

Интрузивные и эффузивные породы отличаются по структуре, текстуре и условиям залегания.

Глубинные породы характеризуются главным образом равномернозернистой, крупно- и среднезернистой структурой, моно-

литностью, весьма ничтожной пористостью. При отсутствии тектонической трещиноватости в невыветрелом состоянии они практически водонепроницаемы, обладают весьма высокой прочностью на раздавливание. Временное сопротивление сжатию у некоторых типов пород этой группы достигает 4000 кг/см^2 . В зависимости от характера структуры прочность может уменьшаться в 2—3 раза.

Наибольшей прочностью обладают породы с мелкокристаллической равномернозернистой структурой, наименьшей — неравномернозернистой порфировидной структурой. При выветривании они теряют свою первоначальную прочность. Уменьшение прочности под влиянием выветривания зависит прежде всего от структурных особенностей. Наибольшему разрушению подвержены неравномернозернистые породы. Наиболее прочные породы с мелко- и скрытокристаллической структурой, полностью раскристаллизованные, без крупных вкрапленников и стекла.

По химическому составу это главным образом силикатные породы. В зависимости от содержания SiO_2 они делятся на кислые ($\text{SiO}_2 > 65\%$), средние ($\text{SiO}_2 = 52\text{—}65\%$), основные ($\text{SiO}_2 = 42\text{—}52\%$) и ультраосновные ($\text{SiO}_2 < 40\%$). В минералогическом составе характерно преобладание кварца (граниты) или полное его отсутствие (габбро). Из других главных породообразующих минералов в этих породах присутствуют слюда, полевые шпаты, нефелин, роговая обманка, авгит, оливин и др.

Состав минералов в магматических породах представляет большой интерес для инженеров-геологов, так как от него в значительной мере зависит степень устойчивости породы по отношению к выветриванию.

Ниже дается характеристика наиболее распространенных минералов магматических пород.

Кварц — один из наиболее устойчивых минералов в коре выветривания, породы с большим и равномерным содержанием кварца и мелкокристаллической структурой характеризуются весьма большой стойкостью против выветривания.

Слюды способствуют физическому выветриванию пород. Под влиянием колебаний температуры и периодического замораживания и размораживания породы, содержащие большое количество слюды, теряют связи и расслаиваются.

Полевые шпаты устойчивы в совершенно свежем состоянии. Поутневшие и трещиноватые кристаллы быстро разрушаются. Устойчивость зависит от характера минерала. Наиболее устойчивы против выветривания ортоклаз и альбит, наименее — основные плагиоклазы.

Нефелин выветривается быстрее полевых шпатов, поэтому нефелиновые породы менее стойки, чем полевошпатовые.

Роговая обманка и авгит обладают сравнительно высокой устойчивостью против выветривания даже при действии кислот, образующихся при разложении пирита, поэтому ультраосновные породы, сложенные главным образом этими минералами, характеризуются высокой стойкостью против действия агентов выветривания.

Прочность и крепость некоторых пород класса А

Номенклатурная единица	Название номенклатурных единиц	Временное сопротивление сжатию, кг/см ²	Коэффициент крепости $f_{кр}$
Группа	Магматические	600—4600	10—20
Подгруппа	Глубинные (интрузивные)	800—3200	10—20
Тип	Собственно глубинные	800—2800	10—15
Подтип	Равномернокристаллические, мелко- и среднезернистые	1000—2800	10—15
Вид	Граниты	1200—2400	10—15
	Диориты	1400—2800	10—15
	Сиениты	1000—2200	10—15
Подтип	Порфиридные и крупнозернистые	800—1600	10
Вид	Граниты	800—1600	10
Тип	Жильные	1100—3200	12—20
Подтип	Микрокристаллические	1200—2800	14—16
	Порфиридные	1100—3200	12—20
Вид	Диориты	1600—3100	15—18
	Габбро	1900—3200	15—20
	Пегматит	1100—3200	12—18
Подгруппа	Излившиеся (эффузивные)	600—4600	12—20
Тип	Палеотипные	600—2800	12—18
Подтип	Порфиновые	600—2800	12—16
Вид	Порфиры	1300—2600	15—18
Тип	Кайнотипные	800—2600	12—18
Подтип	Порфиновые пористые	800—2600	12—18
Вид	Андезиты	800—2600	12—18
Подтип	Микро-неполнокристаллические	900—4600	15—20
Вид	Базальты	900—4600	15—20
Группа	Метаморфические	50—5700	4—20
Подгруппа	Регионально-метаморфические	60—5700	4—20
Тип	Метаморфизованные	60—5700	8—20
Подтип	Гнейсовидные	60—2850	8—18
Вид	Гнейсы	60—1200	8—15
	Магматиты	600—2800	15—18
Подтип	Сланцеватые (кристаллические сланцы)	900—1800	5—8
Вид	Кварциты	1500—5700	18—20
Тип	Слабометаморфизованные	100—900	4—5
Подтип	Филлиты	100—900	5
	Глинистые сланцы	150—800	4
Подгруппа	Контактно-метаморфические	50—2000	—
Тип	Метаморфизованные	600—2000	—
Вид	Роговики	600—2000	—
Тип	Слабометаморфизованные	450—1270	8
Подгруппа	Тектониты	50—1900	—
Вид	Милониты	50—1900	—
Группа	Осадочные	10—3000	2—15
Подгруппа	Обломочные цементированные	30—1700	4—15
Тип	Крупнообломочные	80—1600	>10
Подтип	С очень прочным и стойким (кремнистым) цементом	>500	>10

Номенклатурная единица	Название номенклатурных единиц	Временное сопротивление сжатию, кг/см ²	Коэффициент крепости $f_{кр}$
	С прочным и стойким цементом	500	—
	С прочным и нестойким (мергелистым) цементом	~ 850	—
	С непрочным и нестойким цементом	< 350	—
Тип	Мелкозернистые	30—1700	4—15
Вид	Кремнистые песчаники	90—1700	4—15
	Мергелистые	50—250	—
	Глинистые	30—155	—
Подгруппа	Химические и биохимические	10—3000	2—10
Тип	Кремнистые	30—700	6
Вид	Опоки	30—700	6
Тип	Карбонатные	10—3000	2—10
Подтип	Плотные	80—1800	3—10
Вид	Известняки	200—2000	8—10
	Доломиты	200—1600	8
	Мергели	80—420	3
Подтип	Неплотные	10—150	2
Вид	Известняки-ракушечники	10—30	2
	Мел	50—150	2
Тип	Сульфатные	50—100	2
Вид	Гипс	50—100	2
Подгруппа	Глинистые и пылеватые	60—300	4
Тип	Глинистые и пылеватые отвердевшие	60—300	4
Подтип	Размокаемые	60—300	4
Вид	Аргиллиты	60—300	4

Оливин — наиболее неустойчивый минерал, быстро подвергающийся разложению под влиянием колебания температуры и действия воды, особенно содержащей серную кислоту.

Из других минералов следует отметить *пирит*, который легко окисляется, образуя с водой серную кислоту. Последняя ускоряет процесс разложения других минералов.

В целом кислые по химическому составу глубинные породы поддаются выветриванию значительно меньше, чем основные и ультраосновные, содержащие значительное количество темных неустойчивых минералов. В результате конечного процесса разложения основных породообразующих минералов образуются вторичные глинистые минералы, преобладающие в осадочных глинистых породах.

Залегают глубинные магматические породы в виде значительных массивов, иногда в виде линейно вытянутых относительно небольших тел (жилы, дайки) среди других пород. Залегание в виде более или менее значительных массивов обеспечивает однородность инженерно-геологической обстановки на значительных площадях. В связи с небольшой пористостью (при отсутствии тектонической трещиноватости и сильной выветрелости) они обладают ничтожной водопроницаемостью, практически не растворяются в воде и отличаются высокой механической прочностью на раздавливание

(табл. 46). Глубинные породы характеризуются высокой однородностью свойств и могут служить надежным основанием для любых инженерных сооружений, поэтому при строительстве наземных гражданских и промышленных сооружений инженерно-геологическая оценка этих пород особых затруднений не вызывает. При строительстве туннелей, шахт и других подземных сооружений, а также при гидроэнергетическом строительстве основные исследования направляются на изучение степени выветрелости, трещиноватости и выявление зон тектонических нарушений в массивах этих пород.

Трещины и тектонические нарушения нарушают монолитность пород, образуют ослабленные зоны, затрудняющие проходку горных выработок вследствие частых обрушений породы. Трещины являются путями движения подземных вод, обводняющих выработки. При значительной трещиноватости водопритоки достигают иногда весьма больших размеров и осложняют горнопроходческие работы.

При гидротехническом строительстве изучение трещиноватости имеет большое значение с точки зрения оценки возможных утечек воды из водохранилищ. Особенно опасны в этом отношении зоны тектонических нарушений. В районах высокой сейсмичности по ослабленным зонам могут происходить подвижки земной коры, весьма опасные для устойчивости жестких массивных гидротехнических сооружений (гравитационных железобетонных плотин, шлюзов, напорных трубопроводов и др.).

Излившиеся породы отличаются большим разнообразием свойств. Эта подгруппа магматических пород объединяет два основных типа пород: палеотипные (измененные), в высшей степени плотные, вязкие породы (диабазы, порфириты и др.), и кайнотипные (свежие, сохранившиеся), сильно пористые, «ноздреватые» и хрупкие породы (трахиты, пемза, андезиты и др.).

В структурном отношении излившиеся породы весьма разнообразны. Среди них встречаются всевозможные переходы от нераскристаллизованных аморфных вулканических стекол к микрозернистым кристаллическим и скрытокристаллическим разностям (диабазы, фельзиты и др.).

В тектурном отношении большинство эффузивов характеризуются различными и резко выраженными формами отдельности. Наиболее типичны для эффузивов столбчатая (базальты), пластинчатая (кварцевые порфиры) и шаровая (диабазы) текстуры.

Наибольшей выдержанностью инженерно-геологических свойств обладают палеотипные эффузивы: они всегда весьма прочные, вязкие, с отчетливо выраженными явлениями вторичного изменения вулканического стекла. К этому типу пород относятся кварцевые порфиры, фельзиты, ортофиры, порфириты, диабазы, нефелиновые порфиры и др.

Кайнотипные эффузивы отличаются крайней невыдержанностью инженерно-геологических свойств. Они почти всегда сильнотрещиноватые, разбиты на отдельности различной формы. Среди них выде-

ляются три подтипа: сильнопористые порфиристого строения, стекловатые и микро-неполнокристаллические. Прочность первых двух (трахиты, липариты, обсидиан и др.) значительно меньше третьих (базальты, дациты и др.).

По содержанию SiO_2 эффузивные породы, аналогично интрузивным, разделяют на кислые, средние, основные. В их строении принимают участие те же основные породообразующие минералы, что и в интрузивных породах: кварц, полевые шпаты, слюды, роговая обманка, авгит, оливин, нефелин и др. Значительное место в строении этих пород занимает нераскристаллизованное вулканическое стекло.

Эффузивные породы также подвержены изменениям под влиянием агентов выветривания. Характер и скорость процессов выветривания этих пород зависят от их текстуры, структуры и минералогического состава.

Прочность на раздавливание излившихся невыветрелых пород очень велика и обычно превышает прочность глубинных магматических пород. Временное сопротивление раздавливанию иногда превышает 4000 кг/см^2 (базальты, андезиты). При выветривании прочность снижается. Однако в целом сопротивляемость выветриванию этих пород значительно больше, чем глубинных пород. Залегают они в виде покровов и потоков, реже в виде куполовидных массивов, а также межпластовых залежей среди осадочных пород.

Эффузивные породы, как и интрузивные, в невыветрелом состоянии являются надежным основанием для различных сооружений и могут выдерживать большие нагрузки. При оценке их инженерно-геологических свойств основное значение имеют трещиноватость и отдельность, обуславливающие высокую водопроницаемость, а также тектонические нарушения массивов таких пород. Залегание молодых эффузивов в виде покровов среди осадочных, более слабых пород значительно снижает их устойчивость в массиве, особенно при наклонном залегании.

Показатели основных физико-технических свойств подгруппы излившихся пород приведены в табл. 46.

Группа метаморфизованных пород. К этой группе относятся разнообразные по составу и свойствам породы, образовавшиеся в процессе метаморфизации — изменения магматических и осадочных горных пород под влиянием высокого давления (динамометаморфизм), высокой температуры (пирометаморфизм) и привноса растворами различных минеральных веществ (метасоматоз).

В процессе метаморфизации в материнских (магматических и осадочных) горных породах происходят глубокие изменения минералогического, а иногда и химического состава, структуры и текстуры породы и ее физико-механических свойств.

Под действием высокой температуры происходит обжиг, перекристаллизация или полное переплавление пород.

Под влиянием высоких температур типичные осадочные породы — глины — теряют свои основные свойства — мягкость, пластичность, легкую деформируемость и переходят в группу прочных

скальных пород (роговики), известняки и мягкий мел превращаются в крупнозернистую кристаллическую породу — мрамор, а чистые кварцевые пески и песчаники — в кварциты, очень твердую породу.

Под действием высокого давления, развивающегося на больших глубинах от тяжести вышележащих толщ, породы уплотняются, образуются различные сланцы, характеризующиеся резкой анизотропностью свойств по плоскостям, перпендикулярным и параллельным к плоскостям сланцеватости.

Очень часто высокая температура и высокое давление действуют одновременно и в этом случае материнские породы претерпевают наиболее сильные изменения. Они превращаются в типичные глубокометаморфизованные породы — гнейсы, мигматиты и др.

Кроме высокого давления и температуры мощным фактором метаморфизации пород являются горячие газы и минерализованная вода, которые несут с собой летучие вещества, отлагающиеся в породе и меняющие ее химический состав (гидрометаморфизм и пневмометаморфизм). Типичная порода этого типа метаморфизма скарны — нерастворимые породы, возникающие при метаморфизации растворимых карбонатных пород (различных известняков).

Метаморфизм магматических пород часто вызывает появление в них полосатых и слоистых текстур, сланцеватости, повышает трещиноватость, увеличивает водопроницаемость и уменьшает устойчивость против морозного выветривания.

Метаморфизм осадочных пород (и в первую очередь наиболее распространенных среди них глинистых отложений) приводит к обезвоживанию, уплотнению отложений, уменьшению пористости, увеличению их прочности, превращению их при высокой степени метаморфизации в скальные породы.

По общей обстановке и масштабам процесса различают *контактовый* и *региональный метаморфизм*.

Контактовый метаморфизм ограничен пространственно зоной контакта метаморфизующихся пород с метаморфизующим фактором. Степень метаморфизации уменьшается по мере удаления от поверхности контакта.

Главнейший фактор контактового метаморфизма — высокая температура, обуславливаемая внедрением расплавленной магмы, а также летучие вещества и горячие минерализованные воды. Ширина зоны контактового метаморфизма может достигать нескольких десятков километров. Она обычно характеризуется значительным разнообразием слагающих ее пород и постепенной сменой различной степени измененных пород нормальными — неизмененными.

Региональный метаморфизм происходит на более или менее значительной глубине. Основным фактором изменения пород является высокое давление. Толщи регионально-метаморфизованных пород имеют, как правило, весьма значительную мощность, меньшее разнообразие пород и менее частую их смену, чем в контактово-метаморфизованной зоне.

В зависимости от характера метаморфизма в этой группе пород

различают подгруппы регионально-метаморфических, контактово-метаморфических и тектонитов.

Подгруппа регионально-метаморфических пород. Типичные представители регионально-метаморфических пород — гнейсы и кристаллические сланцы, слагающие обычно толщ пород большой мощности и широкого распространения. По степени метаморфизации эту подгруппу пород делят на два типа: *сильно-метаморфизованных* и *слабометаморфизованных*.

Сильнометаморфизованные породы характеризуются коренными изменениями материнской породы: ее минералогического и химического состава, структуры, текстуры, форм и условий залегания.

Регионально-метаморфизованные породы делят на три основных подтипа: гнейсовидные, сланцеватые (кристаллические сланцы) и слоисто-сланцеватые породы.

К *гнейсовидным породам* относятся гнейсы, магматиты, эклогиты и др. Наиболее характерным представителем этого подтипа пород являются гнейсы. По своим свойствам породы этого подтипа приближаются к глубинным магматическим породам. Они обладают большой прочностью. Стойкость против выветривания возрастает с уменьшением в них полевых шпатов и слюд и увеличением кварца. Под действием морозного выветривания гнейсы обычно распадаются на отдельные плиты и пластины, толщина которых может составлять всего несколько миллиметров (кровельные и аспидные сланцы).

К этому же подтипу пород относятся также породы массивного сложения — амфиболиты, змеевики и др.

Кристаллические сланцы. Сланцы (слюдяные, хлоритовые, тальковые, амфиболовые и др.) отличаются от массивных метаморфических пород отчетливо выраженной слоистостью — сланцеватостью. Эта особенность кристаллических сланцев обуславливает резкую анизотропность их физико-механических свойств по разным направлениям. Они сравнительно легко размягчаются под влиянием воды и относительно быстро выветриваются. В результате выветривания образуются характерные продукты выветривания — мелкая щебенка.

Главнейшими представителями *слоисто-сланцевых пород* являются кварциты, яшмы, известковые сланцы, мраморы, отличающиеся, как правило, мономинеральным составом. Этот подтип пород является продуктом метаморфизации осадочных пород, для него характерно сохранение слоистой формы залегания материнских осадочных пород.

Породы отличаются большой прочностью и однородностью инженерно-геологических свойств. Среди них есть разности, растворимые в воде (мрамор).

Слабометаморфизованные породы характеризуются сохранением формы залегания материнских пород и их структурно-текстурных особенностей. К этому типу пород относятся филлиты (глинисто-слюдяные и серицитовые сланцы) и разнообразные глинистые сланцы: глинистые, глинисто-песчаные, углисто-глинистые и др.

Прочность слабометаморфизованных пород в увлажненном состоянии значительно меньше, чем в сухом. Они относятся к размягчаемым породам, отличаются резкой анизотропностью физико-механических свойств в разных направлениях. Так, предел прочности на сжатие параллельно сланцеватости может быть в 5—10 раз меньше предела прочности в направлении, нормальном сланцеватости. Та же самая закономерность наблюдается и в отношении сопротивления сдвигающим усилиям и фильтрационных свойств.

Контактово-метаморфизованные породы. Как уже отмечалось выше, породы этой подгруппы в силу особенностей процессов метаморфизации их отличаются большой неоднородностью состава и разнообразием инженерно-геологических свойств.

Прочность их зависит от расположения по отношению к интрузивному или эффузивному телу, вызвавшему метаморфизацию. Расположенные в зоне непосредственного контакта с интрузивом роговики, спилзиты, а также скарны являются в высшей степени прочными и стойкими породами по отношению к выветриванию.

Роговики образуются преимущественно из осадочных глинистых пород. Процесс метаморфизации их заключается в кристаллизации глинистого материала в твердом состоянии без плавления. Они характеризуются плотной мелкокристаллической структурой и из этой подгруппы пород являются наиболее прочными.

Скарны образуются также в зоне непосредственного контакта с интрузивными телами в результате изменения известняков под влиянием высокой температуры и привноса различных веществ (например, кремнезема), которые уменьшают пористость, растворимость и резко увеличивают монолитную прочность.

Спилзиты образуются в контактовой зоне с лавой диабазового состава из глинистых сланцев под влиянием высокой температуры и привноса материала, богатого окислами железа. Имеют характерное пятнистое строение.

По мере удаления от непосредственного контакта образуются породы менее метаморфизованные (различные сланцы), прочность которых уменьшается по мере удаления от интрузива.

Тектониты. Эта подгруппа пород представляет собой продукты тектонической переработки различных пород в зонах тектонических нарушений (сдвигах, сбросах, надвигах и др.). Основными процессами метаморфизации в этом случае являются дробление, перетиранье, уплотнение и последующая частичная или полная цементация.

Структура тектонитов типичная катакластическая без какой-либо существенной перекристаллизации. Имеют они сравнительно ограниченное распространение. Характеризуются, как правило, невыдержанностью физико-механических свойств, обладают повышенной водопроницаемостью и размягчаются.

Наиболее типичные представители этой подгруппы — различные брекчии трения и милониты. Первые представляют собой разнообразные дробленые породы, состоящие из глыб и обломков, часто цементированных. Свойства брекчий трения весьма различны

и зависят от характера, состава и размера обломков и от состава цемента. В целом тектонические брекчии в инженерно-геологическом отношении являются слабыми породами.

Милонитами называют раздробленную перетертую и сильно спрессованную породу (милонитизированные известняки, доломиты, различные магматические породы), обладающую большой прочностью и твердостью.

Группа осадочных цементированных пород. Осадочные породы объединяют разнообразные горные породы. Две подгруппы осадочных пород весьма близки по своим свойствам к магматическим и метаморфическим горным породам. Это обломочные, химические и органогенные породы с жесткими связями между зернами (цементированные). К группе цементированных пород следует отнести также глинистые отвердевшие породы. От магматических и метаморфических пород они отличаются относительно меньшей прочностью и характером взаимодействия с водой. Некоторые из них под влиянием воды размягчаются, набухают и растворяются. В то же время осадочные породы в целом отличаются повышенной устойчивостью против выветривания, особенно химического.

Подгруппа обломочных цементированных пород. Она представлена крупнообломочными и мелкообломочными (мелкозернистыми) породами — брекчиями, конгломератами, песчаниками различной зернистости и с цементом различного состава (кремнистым, железистым, карбонатным, гипсовым, глинистым и др.). Эти породы различаются между собой также по характеру цемента. Различают цемент пор, цемент контактов и базальный цемент.

Прочность обломочных цементированных пород определяется прочностью слагающих их обломков (зерен), составом цемента и характером цементации. В связи с этим внутри подгруппы выделяют по размеру обломков типы пород — крупнообломочные (брекчии, конгломераты) и мелкозернистые (песчаники), а по прочности и водостойкости цемента подтипы — крупнообломочные и мелкозернистые породы с очень прочным и стойким кремнистым цементом (кремнистые конгломераты, кремнистые брекчии, кремнистые песчаники); крупнообломочные и мелкозернистые породы с прочным и стойким железистым или карбонатным цементом (железистые или карбонатные конгломераты, брекчии и песчаники); крупнообломочные и мелкозернистые с прочным, но не стойким цементом (мергелистые конгломераты, брекчии и песчаники); крупнообломочные и мелкозернистые со слабым и нестойким цементом (глинистые, гипсовые, глинисто-гипсовые конгломераты, брекчии и песчаники).

Породы с глинистым и гипсовым цементом сильно размягчаются под действием воды, а некоторые разности при наличии в цементе легкорастворимых солей частично растворяются и теряют связи между зернами (обломками), превращаются в нецементированные обломочные породы.

Подгруппа химических и биохимических пород. К этой подгруппе пород относят породы, которые образовались в

морях и замкнутых бассейнах в результате выделения из воды растворенных в ней веществ, а также в результате жизнедеятельности различных простейших организмов. Физико-механические свойства химических и биохимических пород очень пестрые и зависят от химико-минералогического состава, плотности и зернистости. Очень важным показателем инженерно-геологических свойств этих пород является растворимость. В рассматриваемой подгруппе выделяют несколько основных типов и подтипов пород.

Кремнистые породы, или силициты. К химическим и биохимическим кремнистым отложениям относят породы, в составе которых преобладает свободный кремнезем. Кремнистые породы представляют собой водные отложения. В качестве примера приведем описание некоторых видов этих пород.

Диатомит — макроскопически белая или желтоватая, очень легкая пористая порода, состоящая из мельчайших слабосцементированных частиц органогенного происхождения (диатомовые водоросли). В природе имеет ограниченное распространение. В воде практически нерастворима. Малопрочная порода. Временное сопротивление сжатию, как правило, не превышает 50 кг/см^2 и только в редких случаях достигает 100 кг/см^2 и более.

Трепел — кремнистая порода, по своим свойствам близка к диатомитам. Это очень легкая, слабосцементированная порода, состоящая преимущественно из очень мелких частиц опала. Иногда в трепеле наблюдается примесь пылеватых и глинистых частиц.

Опоки — наиболее известные в инженерной практике кремнистые породы, состоящие главным образом из опала и содержащие иногда кварц, глауконит и карбонаты, сильнопористые, легкие, характеризуются малым объемным весом. Прочность и стойкость зависят от примеси глинистых минералов.

Рядом промежуточных типов опоки связаны с глинами (глинистые опоки, кремнистые глины) и с песчаными породами (песчаные опоки, опоквидные песчаники). Уменьшение содержания свободного кремнезема и увеличение глинистых частиц уменьшают механическую прочность опок и сообщают им характерные свойства глинистых пород — набухаемость, сжимаемость, размокаемость и др.

Карбонатные породы. К этому типу осадочных сцементированных пород относятся разнообразные по составу, строению и свойствам известняки, доломиты, мел, мергель, которые по степени плотности подразделяются на два подтипа: плотные и неплотные.

Среди карбонатных пород встречаются растворимые в воде, а также размягчаемые. Прочность различная. Наиболее прочные — плотные мелкозернистые известняки и доломиты, временное сопротивление сжатию у которых достигает $1500\text{—}2000$ и даже 3000 кг/см^2 .

Известняки — наиболее распространенная разновидность этого типа пород. Образуются в неглубоких (до 200 м) морских бассейнах. Основным порообразующим минералом является кальцит. В качестве примеси известняки могут содержать пирит, кремнезем, глауконит, доломит, а также песчанистый и глинистый материал.

В зависимости от количества примесей наблюдаются постепенные переходы от известняков и доломитизированных известняков к доломитам, от известняков и глинистых известняков к мергелям и известковистым глинам и т. д.

В зависимости от наличия тех или иных примесей меняются и свойства известняков. Чистые мелкокристаллические известняки обладают большой прочностью (до 2000 кг/см^2), слаборастворимы в воде, не размокают. Водопроницаемость зависит от степени трещиноватости и закарстованности. Глинистые разности известняков в воде размягчаются и теряют прочность, временное сопротивление таких известняков снижается до $200\text{—}300 \text{ кг/см}^2$ в сухом состоянии и до $50\text{—}100 \text{ кг/см}^2$ после водонасыщения.

По происхождению известняки разделяются на химические, образующиеся в результате выпадения из морской воды карбоната кальция, и биохимические — органогенные, накопление которых связано с жизнедеятельностью организмов. В зависимости от того, какие организмы преобладают в органогенных известняках, различают известняки-ракушечники, нуммулитовые, коралловые, мшанковые. Из них наиболее слабыми разностями являются известняки-ракушечники, временное сопротивление сжатию которых обычно не превышает $10\text{—}30 \text{ кг/см}^2$.

Доломиты — распространенная порода, состоящая из минерала доломита; формируется она в сравнительно мелких усыхающих бассейнах, поэтому очень часто в толщах доломитов встречаются залежи гипса и галита.

Плотные разности доломитов характеризуются большой механической прочностью (до 3000 кг/см^2), которая уменьшается по мере увеличения содержания в доломитах кальция. В природе наблюдается постепенный переход от доломитов к известнякам (известняковые доломиты, доломитизированные известняки). В результате выщелачивания доломитов (выноса кальция и гипса) образуется доломитовая мука — рыхлая несцементированная порода, состоящая из зерен доломита размером $0,25 \text{ мм}$. По своим свойствам доломитовая мука сходна с тонкозернистыми песчаными породами.

Мел — карбонатная порода, состоящая в основном из тонкозернистого порошкообразного кальцита с небольшой примесью (до 20%) обломков раковин фораминифер, иноцерамов и других многоклеточных, с примесью глины, т. е. по своему генезису мел является биохимической породой, образующейся в условиях одновременного накопления органических остатков и выделения из воды кальцита.

В сухом состоянии мел представляет довольно плотную, но пористую породу, характеризующуюся временным сопротивлением сжатию, равным $10\text{—}150 \text{ кг/см}^2$. Монолитные залежи мела обладают слабой водопроницаемостью, при наличии трещин водопроницаемость может быть значительной. Во влажном состоянии мел становится мягким, пастообразным, а при значительном содержании глины приобретает пластичность.

Мергели — известково-глинистая порода, у которой глинистые частицы сцементированы карбонатным материалом. В зависимости от содержания в породе кальцита наблюдается целый ряд переходных пород от глин к чистым известнякам: глины ← известковые глины ← мергели глинистые ← мергели ← известковые мергели ← мергелистые известняки ← известняки. Мергели обычно содержат 25—50% кальцита. Они способны набухать, размягчаться и размокать. Водопроницаемость зависит от степени трещиноватости. Набухающие разности практически водонепроницаемы.

Сульфатные и галоидные породы — типичные представители хемогенных пород. Они характеризуются значительной растворимостью в воде и слабой прочностью. Наиболее распространенными разновидностями являются гипс, ангидрит, галит и сильвин.

Гипс и его безводная разность — *ангидрит* — встречаются чаще всего в виде линз и прослоев среди доломитов, мергелей и глин, а также в виде цемента в песчаниках и конгломератах. В глинистых породах линзы гипса обычно приурочены к зоне поверхностного выветривания. На больших глубинах гипс также встречается в глинах, но в виде отдельных кристаллов и друз. Наличие гипса в породах является отрицательным фактором, так как он легко выщелачивается.

Галит, сильвин и другие легкорастворимые соли образуются в замкнутых соленых морских лагунах и озерах. Отложения их иногда достигают огромных мощностей. В инженерно-геологическом отношении такие залежи не представляют интереса, так как не могут рассматриваться в качестве оснований сооружений. Залежи обычно разрабатываются и служат сырьем для химической промышленности.

Весьма большое инженерно-геологическое значение имеет характер содержания солей в породах: рассеянное или в виде скоплений (небольшие линзы и прослои среди глин, доломитов и других пород). В этом случае устойчивость сооружений, возводимых на соленосных породах, зависит от возможности растворения солей. Растворение приводит к образованию в породах пор, полостей и других пустот, увеличивает водопроницаемость этих пород и снижает их прочность.

Подгруппа глинистых и пылеватых отвердевших пород. Породы этой подгруппы обладают специфическими особенностями, благодаря которым они являются как бы переходными между классом пород с жесткими связями и классом пород без жестких связей. Глинистые и пылеватые отвердевшие породы часто обладают свойствами, характерными для обоих указанных классов. Например, обладая жесткими связями, они резко теряют свою прочность в воде, размягчаются, а некоторые типы их размокают в воде, что совершенно не характерно для скальных пород. В сухом состоянии они обладают относительной прочностью, практически несжимаемы, пористость небольшая. К этой подгруппе пород относятся аргиллиты, алевролиты, мергелистые глины, кремнистые глины и др.

Аргиллиты — твердые камнеподобные горные породы, образующиеся из глин в результате уплотнения под большим давлением, дегидратации и цементации, т. е. глинистые породы в начальной стадии метаморфизма. Аргиллиты обычно в воде не размокают, временное сопротивление сжатию может достигать 60 и даже 300 кГ/см².

Алевролиты — цементированные тонкие пылеватые пески (алевролиты) полимиктового состава. Цементирующим веществом в большинстве случаев служат тонкие коллоидные глинистые частицы. По своим свойствам являются переходными породами между рыхлыми обломочными и глинистыми породами. Они относительно быстро размокают. В смеси с водой, при нарушении природного сложения, переходят в текучее состояние (плывуны). Прочность незначительная.

Мергелистые глины состоят из глинистых минералов, сцементированных кальцитом. Некоторые разности мергелистых глин обладают прочностью до 50—100 кГ/см². Пористость обычно не превышает 30%. Мергелистые глины сжимаются слабо, в воде часто размокают, слабопластичные.

Кремнистые глины — глинистая порода, в которой глинистые частицы сцементированы кремнекислотой. Прочность таких глин достигает 100 кГ/см² и более. В воде они обычно не размокают. Некоторые разности кремнистых глин при увлажнении набухают, при этом прочность их уменьшается в 2—3 раза.

Краткая характеристика пород класса Б (дисперсные породы)

К породам класса Б относится значительная часть дисперсных пород, отличающихся большим разнообразием состава и свойств. Они подразделяются на три группы: осадочные породы, почвы и искусственные грунты. Каждая из групп характеризуется своими особенностями, определяемыми происхождением, минералогическим и гранулометрическим составом и другими факторами.

Группа осадочных пород. Эта группа пород включает две подгруппы: глинистые и пылеватые породы и обломочные нецементированные породы.

Подгруппа глинистых и пылеватых пород. Глинистые и пылеватые породы имеют большое практическое значение, так как они широко распространены в природе и часто служат объектом инженерно-геологического изучения для строительства различных сооружений. Они характеризуются большим разнообразием свойств. Основной особенностью этой подгруппы пород является резкое изменение их свойств в зависимости от степени увлажнения. Так, в сухом состоянии глинистые и пылеватые породы представляют собой твердые тела, обладающие довольно большой механической прочностью; при увлажнении механическая прочность резко снижается, они становятся мягкими, пластичными, а при высокой

степени увлажнения могут переходить в текучее состояние, т. е. приобретают свойства жидкого тела.

К глинистым грунтам обычно относят породы, в гранулометрическом составе которых существенную роль играют глинистые частицы ($d < 0,005$ мм), состоящие из характерных вторичных глинистых минералов, образующихся в результате процессов выветривания магматических, метаморфических и цементированных осадочных пород.

В строительной практике к глинистым относят породы, число пластичности которых больше 1. Они практически водонепроницаемы или слабоводонепроницаемы. В воде набухают и размокают, характеризуются специфическими водно-коллоидными связями, вследствие чего получили название связных пород.

Поведение глинистых и пылеватых пород под воздействием различных инженерных сооружений зависит от целого ряда факторов: степени выветрелости, степени влажности, текстурных особенностей, гранулометрического и минералогического состава, характера структуры, отношения к воде (способность к набуханию, размоканию, просадочности), степени уплотненности.

По степени уплотненности выделяют три типа: сильноуплотненные, уплотненные и неуплотненные породы. Они объединяют различные виды пород: глины, суглинки, супеси и лёссовые породы (см. табл. 47).

К *глинам* относятся породы, число пластичности которых > 17 . Они содержат большое количество тонкодисперсных — коллоидных частиц. Содержание глинистых частиц ($< 0,005$ мм) превышает 30% (иногда более 60%). В глинах наиболее ярко проявляются свойства, характерные для подгруппы глинистых пород.

Суглинками называют глинистые породы, у которых число пластичности находится в пределах от 7 до 17. Содержание глинистых частиц в суглинках колеблется от 10 до 30%.

Супеси содержат глинистых частиц от 3 до 10% и характеризуются числом пластичности < 7 . Занимают промежуточное положение между типичными пластичными связными и несвязными породами — песками.

Лёссовые породы по своему гранулометрическому составу могут быть глинами, суглинками и супесями. Для них характерна специфическая структура, обусловленная наличием макропор — вертикальных канальцев. Основная особенность отдельных разновидностей лёссовых пород — способность к самоуплотнению под влиянием увлажнения. По этой особенности они подразделяются на просадочные и непросадочные.

Глинистые сильноуплотненные породы. Породы этого типа характеризуются показателем уплотненности $K_d > 1$, сжатие происходит только при давлениях, превышающих 5 кг/см². По характеру взаимодействия с водой они подразделяются на сильнонабухающие, набухающие и слабонабухающие. Этот тип пород объединяет различные глины, суглинки и супеси, сильно уплотненные в процессе диагенеза под тяжестью вышележащих пород (гравитационное

Некоторые показатели свойств подгруппы глинистых и пылеватых пород класса Б

Номенклатурная единица	Название номенклатурных единиц	Модуль сжатия	Показатель пластичности глинистой фракции	Коэффициент уплотнения K_d	Показатель консолидации B	Пластичность
Тип	Глинистые и пылеватые сильноуплотненные	> 300	$1,25$	> 1	> 0	
Подтип Вид	Сильнонабухающие Глины Суглинки Супеси					> 17 7—17 1—7
Подтип Вид	Набухающие		1,25—0,75			
Подтип Вид	Глины Суглинки Супеси					> 17 7—17 1—17
Подтип Вид	Слабонабухающие		$< 0,75$			17 7—17 1—7
Тип	Глинистые и пылеватые уплотненные			1—0		
Подтип Вид	Твердые Глины Суглинки Супеси	> 300			< 0	> 17 7—17 1—7
Подтип Вид	Скрытопластичные	100—300			0—1	> 17 7—17 1—7
Подтип Вид	Пластичные	> 100			0—1	> 17 7—17 1—7
Подтип Вид	Лёссовые породы просадочные				$< 0,25$	< 15
Тип	Глинистые и пылеватые неуплотненные			< 0		
Подтип Вид	Скрытотекучие Глины Суглинки Супеси				> 1	> 17 7—17 1—7
Подтип Вид	Текучие Глины Суглинки Супеси				> 1	17 7—17 1—7
Подтип Вид	Лёссовые породы просадочные				$< 0,25$	< 15

Некоторые показатели свойств подгруппы обломочных несцементированных пород класса Б

уплотнение) или под влиянием тектонических процессов. При медленном сдвиге деформируются как пластичное тело, а при быстром — как твердые тела (скальваются).

Глинистые уплотненные породы. Этому типу пород свойствен показатель уплотненности $I > K_a > 0$. В зависимости от степени влажности и состояния структурных связей они могут находиться в твердом, пластичном и скрытопластичном состоянии, сжимаются даже под сравнительно небольшими давлениями $0,5—1 \text{ кг/см}^2$. При взаимодействии с водой одни из них набухают, увеличиваясь в объеме (непросадочные), другие — уменьшаются, вызывая характерные деформации — просадки (лёссовые породы). При медленном сдвиге деформации носят пластический характер (ползучесть).

Глинистые неуплотненные породы. Характеризуются показателем уплотненности $K_a < 0$; в зависимости от степени влажности и состояния структурных связей породы могут находиться в скрытотекучем и текучем состоянии или характеризоваться как просадочные. Породы этого типа сильно сжимаются и могут обладать таксоотропными свойствами. Водонасыщенные супеси могут переходить в плавунное состояние, образуя истинные плавунуны.

Подгруппа несцементированных обломочных пород. Подгруппа объединяет крупнообломочные породы — каменные, валунные, гравийные, галечные и др., а также различные пески. Всю подгруппу делят на два типа пород — крупнообломочные и песчаные, которые в свою очередь подразделяют на подтипы, виды и разновидности по наличию заполнителя пор, величине и форме зерен и генезису. Породы этой подгруппы отличаются хорошей водопроницаемостью, которая возрастает по мере увеличения размера обломков. Они состоят главным образом из первичных минералов или из обломков различных горных пород с жесткими связями между зернами. Под нагрузками сжимаются очень слабо, при этом сопротивление внешним усилиям не меняется от степени влажности. Внутреннее трение более значительно, чем у глинистых пород.

Крупнообломочные несцементированные породы состоят из обломков окатанных или неокатанных: $d > 2 \text{ мм}$. По наличию и составу материала, заполняющего промежутки между зернами, их подразделяют на два подтипа. Заполнитель существенным образом влияет на свойства крупнообломочных пород: резко снижает водопроницаемость, уменьшает сопротивление сдвигу, повышает сжимаемость.

Каждый из подтипов (с заполнителем и без заполнителя) делят на виды по размеру и форме обломков (табл. 48). Разновидности выделяются по петрографическому составу обломочного материала и заполнителя, например галечник крупный, гранитного состава с песчаным заполнителем.

Классификацию обломков по размеру и форме см. в табл. 6.

Песчаные несцементированные породы. Объединяют пески разнообразного состава и с размерами частиц от $0,05$ до 2 мм . Породы эти лишены связей, и лишь в тонкозернистых разностях при увлаж-

Номенклатурная единица	Название номенклатурных единиц	Петрографическая характеристика	Коэффициент фильтрации, м/сут	Угол внутреннего трения, град	
				в воздушно-сухом состоянии	под водой
Тип Подтип Вид	Крупнообломочные с заполнителем Каменные и валунные Щебенчатые и галечниковые Хрящеватые и гравийные	Содержание мелкоземистого заполнителя может достигать 50%	Определяется водопроницаемостью заполнителя	В зависимости от заполнителя	
Подтип Вид Вид	Без заполнителя Каменные и валунные Щебенчатые и галечниковые	Преобладают обломки $d > 2 \text{ мм}$ Преобладают обломки $d > 20 \text{ см}$ Преобладают обломки $d = 4—20 \text{ см}$	> 150	> 34	> 34
Тип Подтип Вид	Хрящевые и гравийные Песчаные Гравелистые Грубозернистые Крупнозернистые Среднезернистые Мелкозернистые Тонкозернистые Крупные Мелкие	Преобладают обломки $d = 2—40 \text{ мм}$ Песчаных частиц $> 80\%$, глинистых $< 3\%$ Гравийных частиц $10—20\%$ Преобладают частицы $d = 2—1 \text{ мм}$ Преобладают частицы $d = 1—0,5 \text{ мм}$ Преобладают частицы $d = 0,5—0,25 \text{ мм}$ Преобладают частицы $d = 0,25—0,1 \text{ мм}$ Преобладают частицы $d = 0,1—0,05 \text{ мм}$ Преобладают частицы $d > 0,25 \text{ мм}$ Преобладают частицы $d < 0,25 \text{ мм}$	$3—350$ $0,8—325$ $10—350$ $27—250$ $6—70$ $3—12$ $< 1,5$ > 12 > 12	$27—40$ $31,5—40$ $30—40$	$12—40$ $30—40$
Подтип Вид	Чистые Грубозернистые	Песчаных частиц 90% Преобладают частицы $d = 2—1 \text{ мм}$	$0,4—300$ $78—300$	$30—38$	$27—37$

Номенклатурная единица	Название номенклатурных единиц	Петрографическая характеристика	Коэффициент фильтрации, м/сут	Угол внутреннего трения, град	
				в воздушно-сухом состоянии	под водой
Вид	Крупнозернистые	Преобладают частицы $d = 1-0,5 \text{ мм}$	25-180		
	Среднезернистые	Преобладают частицы $d = 0,5-0,25 \text{ мм}$	5-60		
	Мелкозернистые	Преобладают частицы $d = 0,25-0,1 \text{ мм}$	2-9		
	Тонкозернистые	Преобладают частицы $d = 0,1-0,05 \text{ мм}$	< 1		
	Крупные	Преобладают частицы $d > 0,25 \text{ мм}$	> 10		
	Мелкие	Преобладают частицы $d < 0,25 \text{ мм}$	> 10		
Подтип	Пылеватые	Содержание пылеватых частиц 10-20%	0,3-150	27-35	12-34
Вид	Грубозернистые	Преобладают частицы $d = 2-1 \text{ мм}$	40-150		
	Крупнозернистые	Преобладают частицы $d = 1-0,5 \text{ мм}$	12-110		
	Среднезернистые	Преобладают частицы $d = 0,5-0,25 \text{ мм}$	3-40		
	Мелкозернистые	Преобладают частицы $d = 0,25-0,1 \text{ мм}$	1-7		
	Тонкозернистые	Преобладают частицы $d = 0,1-0,05 \text{ мм}$	0,8		
	Крупные	Преобладают частицы $d > 0,25 \text{ мм}$	> 5		
	Мелкие	Преобладают частицы $d < 0,25 \text{ мм}$	> 5		

нении появляется слабая связь между зернами, которая исчезает при высыхании песка.

Свойства песков зависят от минералогического и гранулометрического состава, формы зерен, наличия примеси глинистого материала и степени плотности естественного сложения. По этим показателям и принято делить песчаные породы на подтипы, виды и раз-

новидности (см. табл. 48). Классификация зерен песка по крупности приведена в табл. 6.

Группа почв. Почвы выделяют в самостоятельную группу пород, они отличаются от любых горных пород тем, что кроме минеральных частиц содержат сложные органические вещества (до 20%) и различные живые организмы, являющиеся важнейшим фактором почвообразования.

Почвы имеют жизненно важное значение для человека, так как являются средой, в которой произрастают различные сельскохозяйственные культуры. Они служат полотном грунтовых дорог, основанием для аэродромов и дорог с различными покрытиями, основанием фундаментов зданий и легких сооружений. Почвы используют как строительный материал для дорожного полотна, при постройке различных земляных сооружений. Они являются важным фактором проходимости, определяющим возможность передвижения различных видов транспорта вне дорог.

Почвы имеют различный гранулометрический состав. Как правило, они обладают более рыхлым сложением, чем породы, на которых они развиваются (материнские породы). Мощность почв обычно не превышает 2 м и редко достигает 5 и более метров.

Физико-технические свойства почв определяются их составом, макроструктурой, строением и степенью увлажнения.

В ходе почвообразовательного процесса на однородной в генетическом отношении материнской породе образуется почва, расчленяющаяся на ряд генетических горизонтов, различных по составу и строению, а следовательно, и по своим физико-техническим свойствам.

Совокупность горизонтов, на которые расчленяется почва, называют *почвенным профилем*.

Верхний горизонт почв обозначают буквой А. В этом горизонте происходят основные процессы накопления и разрушения органического вещества. Окрашен он в более темный цвет, чем нижележащие горизонты. В нем, как правило, отсутствуют легкорастворимые соли, которые из него вымываются. Нижняя часть горизонта выделяется в подгоризонт А₂, называемый горизонтом *вымывания* или элювиальным горизонтом.

Ниже залегает горизонт В, называемый горизонтом *вымывания*, или *иллювиальным горизонтом*. По окраске он напоминает материнскую породу. В горизонте В накапливаются вещества, приносимые водой из горизонта А. Он обычно более плотный, чем горизонт А. Здесь происходит накопление различных солей, а также минеральных и органических коллоидов. Этот горизонт иногда разделяют на подгоризонты В₁ и В₂.

Горизонт В залегает на горизонте С, который представляет собой слабо затронутую почвообразовательным процессом материнскую породу.

Характер почвообразовательного процесса зависит от физико-географических, геологических и биологических факторов (характера пород, климата, геоморфологии, растительного покрова, глуби-

ны залегания грунтовых вод и др.), поэтому основные типы почв обнаруживают *зональный* характер распределения на земном шаре. Наряду с этим наблюдаются почвы, распределение которых на поверхности Земли не подчиняется закону зональности, поэтому все почвы в инженерно-геологической классификации подразделяют на две группы: зональные и интразональные.

Подгруппа зональных почв. Зональные почвы приурочены к различным физико-географическим зонам с характерной растительностью и особенностями климата.

Выделяют следующие типы почв, сменяющие друг друга в направлении с севера на юг: тундровые, подзолистые и дерново-подзолистые, болотные, лесостепные черноземные, каштановые, бурые, сероземные и латеритные.

По литологическому признаку каждый из типов подразделяется на виды: хрящеватые, песчаные, супесчаные, суглинистые и глинистые.

Тундровые почвы формируются в условиях многолетней мерзлоты, сурового климата, незначительного количества летних осадков, маломощного снежного покрова, плохого поверхностного стока и отсутствия лесной растительности. В силу этих причин тундровые почвы в вертикальном разрезе характеризуются малой мощностью (10—50 см). Верхний горизонт их представлен плохо разложившимся торфом.

В инженерно-геологическом отношении тундровые почвы весьма неудовлетворительны. Они не могут служить в качестве естественных оснований сооружений.

Подзолистые и дерново-подзолистые почвы образуются в условиях избыточного увлажнения в полосе хвойных и смешанных лесов. Для этих почв характерно значительное промачивание, вымывание из почвы большого количества солей, поэтому горизонт А этих почв окрашен в белесый цвет, в сухом состоянии рыхлый, мучнистый, похожий на золу и называемый поэтому «подзолом». Горизонт В вследствие накопления полуторных окислов железа и алюминия характеризуется значительной плотностью. Среди этих типов почв наиболее благоприятными в строительном отношении обладают почвы супесчаного и песчаного состава.

Болотные почвы формируются в условиях избыточного увлажнения и плохой дренированности территории. Для них характерно присутствие торфянистого вещества в горизонте А и оглеение горизонта В — раскисление ряда веществ в анаэробных условиях, возникающих под влиянием избыточного увлажнения. Среди болотных почв обычно выделяют собственно болотные почвы, полуболотные и торфяники.

К торфяникам относят болотные почвы при мощности торфа более 50 см. Полуболотные почвы являются переходным подтипом почв между собственно болотными почвами и торфяниками.

Болотные почвы занимают большие пространства на территории СССР. В инженерно-геологическом отношении этот тип почв неблагоприятен для любого вида строительства. Наличие в них торфа обуславливает большую их сжимаемость.

Наличие в них торфа обуславливает большую их сжимаемость.

Лесостепные почвы развиты в зоне лесостепей и являются переходным типом от подзолистых почв к черноземным. В северной части этой зоны преобладают серые лесные почвы на покровных суглинках, в южной — выщелоченные и типичные черноземы, формирующиеся на лёссах. Физико-технические свойства этих почв зависят от гранулометрического состава и материнских пород. В большинстве случаев они характеризуются высокой влагоемкостью, пластичностью, набухаемостью, т. е. отрицательными с инженерно-геологической точки зрения свойствами.

Черноземные почвы широко распространены в степных районах юга и юго-востока СССР. Они образуются под степной травянистой растительностью в условиях равнинного рельефа на лёссах и лёссовидных породах. Черноземные почвы имеют гумусовый горизонт черного или черно-бурого цвета (горизонт А) мощностью 0,5—1 м. Содержание гумуса достигает 20%. Под этим горизонтом залегает менее темный переходный горизонт В мощностью до 1 м со значительным содержанием карбонатов. Он подстилается материнской породой — горизонтом С. Почвы эти не могут быть использованы в качестве оснований сооружений.

В сухую погоду полотно грунтовых дорог на этих почвах сильно пылит, а после дождей и при таянии снега образуется липкая масса, труднопроходимая для всех видов транспорта.

Каштановые и бурые почвы характерны для полупустынь. От черноземных почв они отличаются значительно меньшим содержанием гумуса (1—4%) и наличием легкорастворимых солей в верхних горизонтах. При увлажнении размокают, но быстро высыхают.

Сероземные почвы формируются в условиях пустынь и содержат еще меньше гумуса, чем каштановые и бурые почвы (не более 1—1,5%). Процессы выщелачивания здесь отсутствуют, поэтому легкорастворимые соли встречаются в этих почвах по всему профилю. Быстро размокают и на дорогах образуют труднопроходимую грязь.

Латеритные, или красноземные, почвы образуются в тропических условиях, для которых характерно интенсивное развитие процессов выветривания вследствие высоких температур воздуха и обилия атмосферных осадков. Процессы почвообразования в таких районах распространяются на большую глубину. Почвы почти не содержат гумуса, богаты гидратами окиси алюминия и железа, придающими почвам красную окраску.

Подгруппа интразональных почв. Интразональные почвы формируются под влиянием местных условий почвообразования. Они залегают обычно небольшими площадями среди зональных почв. К интразональным почвам относятся черноземовидные и засоленные типы почв.

Черноземовидные почвы содержат повышенное количество гумуса по сравнению с зональными почвами, среди которых они разви-

ты. Выделяют два подтипа черноземовидных почв: *перегнойно-карбонатные и луговые почвы*.

Перегнойно-карбонатные почвы формируются на карбонатных породах, отличаются повышенным содержанием гумуса по сравнению с подзолистыми и дерново-подзолистыми почвами, среди которых они обычно бывают развиты.

Луговые почвы приурочены к пойменным аллювиальным террасам. Они содержат мало гумуса вследствие ежегодного отложения топкого материала паводковыми водами.

Засоленные почвы содержат большое количество легкорастворимых солей натрия. Они широко распространены в пустынях и полупустынях, в других зонах образуют незначительные пятна.

В сухом состоянии засоленные почвы обладают значительной твердостью, во влажном «раскисают». Среди засоленных почв различают солонцы, солончаки и солоды.

Солонцы характеризуются распыленностью, большой способностью поглощать воду и сильно набухать. В верхнем горизонте этих почв мало легкорастворимых солей; нижние же горизонты обогащены ими. При преобладании в этих почвах хлористого кальция образуются так называемые *мокрые солончаки*, при большом содержании сернокислого натрия, сильно набухающего, — *пухлые солончаки*.

Солончаки в отличие от солонцов содержат большое количество легкорастворимых солей по всему профилю.

Солоды образуются в результате вымывания солей из засоленных почв.

Группа искусственных-антропогенных грунтов. К искусственным, или антропогенным, относятся грунты, образующиеся в результате многообразной хозяйственной деятельности человека: строительства различных сооружений, проведения мелиоративных мероприятий, работы промышленных предприятий, разработки месторождений полезных ископаемых и пр.

Искусственные грунты отличаются исключительной неоднородностью состава, различными условиями залегания, часто содержат много органических веществ и в большинстве случаев имеют рыхлое сложение. Дать какую-либо количественную характеристику их свойств не представляется возможным. В то же время в этой своеобразной группе грунтов можно выделить несколько подгрупп, отличающихся друг от друга условиями накопления.

Культурный слой образуется в результате разнообразной деятельности человека — мусор, строительные материалы, засыпанные мостовые, остатки разобранных зданий и т. д.

Наносные грунты являются отложениями искусственных водоемов — водохранилищ, каналов и прудов.

Насыпные грунты образуются в результате планировки территории, засыпки оврагов, отвалов шлаков и других промышленных отходов, отвалов горнодобывающих предприятий и т. д.

Искусственно улучшенные грунты включают горные породы, подвергавшиеся искусственному воздействию в целях повышения их

прочности, водостойкости, уменьшения водопроницаемости и др.

Искусственно ухудшенные грунты возникают в результате разрушения, обводнения, нарушения структуры в процессе хозяйственной деятельности человека (распахивания, подтопления водами водохранилищ и пр.).

Наиболее капитальные работы, посвященные изучению антропогенных грунтов, принадлежат Ф. В. Котлову (1947, 1967).

Контрольные вопросы

1. Какими общими инженерно-геологическими признаками и свойствами характеризуются породы первого класса — породы с жесткими связями?
2. Какие породы принадлежат ко второму классу — к породам без жестких связей? Их признаки и основные свойства.
3. Основные породообразующие минералы магматических пород и их влияние на прочность и устойчивость пород от разрушения при выветривании.
4. Инженерно-геологические свойства группы метаморфических пород.
5. Какие породы относятся к группе осадочных сцементированных пород и каковы их инженерно-геологические свойства?
6. Какими особенностями состава и свойств характеризуются глинистые породы?
7. Какими особенностями состава и свойств характеризуются несцементированные обломочные породы?
8. Почвы и их характеристика как грунтов.
9. Особенности группы искусственных — антропогенных грунтов.

Литература

- Котлов Ф. В. Культурный слой г. Москвы и его инженерно-геологическая характеристика. — В кн. «Очерки по гидрогеологии и инженерной геологии Москвы и ее окрестностей». М., Изд-во МОИП, 1947.
- Котлов Ф. В. и др. Город и геологические процессы. М., «Наука», 1967.
- Приклонский В. А. Грунтоведение. Ч. 2. М., Госгеолыздат, 1952, гл. 1, 2, 3, 10, 11.
- Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Знангиров Р. С., Осипов В. И., Трофимов В. Т. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1973, гл. IX, X, XII, XIII, XIV, XV.

ГЛАВА 17
О ФОРМИРОВАНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Физико-механические свойства горных пород формируются в течение длительного геологического времени под влиянием сложных процессов петрогенеза. Под термином «петрогенез» понимают всю совокупность процессов образования и сложных процессов дальнейшего изменения горных пород в земной коре. Процессы эти протекают в земной коре непрерывно, вызывая образование одних горных пород и разрушение — преобразование других.

Материнскими — родоначальными — породами являются магматические горные породы. В зависимости от условий застывания — затвердения магмы образуются глубинные и излившиеся магматические породы, которые в свою очередь в зависимости от состава магмы (содержания кремнезема) разделяются на кислые и основные.

Глубинные, или интрузивные, породы формируются на значительных глубинах от поверхности Земли. Кристаллизация магматического расплава на глубине происходит постепенно под влиянием медленного охлаждения, большого давления и при наличии различных газов. В результате формируются, как правило, компактные породы полнокристаллической и равномернозернистой структуры.

Излившиеся, или эффузивные, породы, образуются в результате остывания магмы на поверхности Земли, т. е. в условиях атмосферного давления, быстрого охлаждения и возможности свободного выделения газов. Поэтому формируются, как правило, слабо раскристаллизованные пористые породы, для которых характерны различные формы отдельности. Каждая из указанных выше групп магматических пород отличается своими характерными петрографическими признаками, однако для всех магматических пород в невыветренном состоянии присущи и общие в инженерно-геологическом отношении свойства: они обладают высокой прочностью, твердостью, не дают остаточных деформаций даже при весьма больших нагрузках, практически нерастворимы в воде. Изменения магматических пород связаны с процессами метаморфизма, тектоническими и выветривания.

Под влиянием тектонических движений, продолжающихся в процессе остывания и кристаллизации магмы, а также под влиянием внутреннего давления, обусловленного неравномерностью застыва-

ния и наличием газов в массиве породы, образуются системы открытых и закрытых трещин, которые оказывают большое влияние на прочность породы, ее деформируемость, водопроницаемость, устойчивость в массиве, выветриваемость.

Большие внутренние напряжения, возникающие в массиве магматических пород, не всегда гасятся и иногда сохраняются в них в течение длительного геологического времени.

Вследствие описанных особенностей физико-механических свойств магматических пород в естественных условиях залегания (в массиве) отличаются от физико-механических свойств отдельного образца той же породы. Поэтому в основу изучения магматических пород, как и других типов пород, должны быть положены комплексные полевые и лабораторные методы исследования, заключающиеся в полевом геологическом изучении условий и формы залегания, тектоники, текстурных особенностей, петрографическом изучении породы, исследовании ее свойств на характерных образцах в лабораторных условиях. В отдельных случаях (при строительстве тяжелых арочных и гравитационных плотин, туннелей и других сооружений) изучение физико-механических свойств должно дополняться полевыми методами изучения физико-механических свойств породы в естественных условиях в массиве.

Процессы метаморфизма и выветривание снижают прочность магматических пород. Они вызывают образование отдельностей, сланцеватости, дробление и трещиноватость, а длительное воздействие агентов выветривания приводит иногда к полному разрушению магматических пород. Материал, накапливающийся в результате такого разрушения, служит основой для формирования различных *осадочных пород*.

С инженерно-геологической точки зрения наибольший практический интерес представляет изучение влияния процессов петрогенеза на формирование свойств осадочных горных пород и особенно осадочных пород без жестких связей. Эти породы покрывают большие площади земной коры, обладают многообразными, сложными и часто неблагоприятными инженерно-геологическими свойствами.

Магматические и осадочные породы с жесткими связями между зернами в невыветренном состоянии представляют значительно меньший интерес, так как они, как правило, характеризуются высокой механической прочностью, позволяющей возводить на них любые сооружения.

Метаморфические горные породы, как известно, образуются из магматических и осадочных горных пород. Процессы метаморфизации являются как бы одной из стадий преобразования осадочных и магматических горных пород. При этом инженерно-геологические свойства осадочных горных пород в процессе метаморфизма обычно улучшаются, а инженерно-геологические свойства магматических пород в процессе метаморфизма могут как улучшаться, так и ухудшаться (рассланцевание, тектоническая трещиноватость, неоднородность и т. д.).

Роль процессов литогенеза в формировании физико-механических свойств осадочных горных пород

Процессы формирования осадочных горных пород подробно рассматриваются в курсе петрографии осадочных пород. В предлагаемой книге они освещаются только в такой мере, в какой это необходимо для получения общих представлений о формировании физико-механических свойств горных пород.

Совокупность процессов образования и изменения осадочных горных пород в земной коре называют *литогенезом*.

Процессы литогенеза начинаются с *осадконакопления* (седиментогенеза), т. е. с накопления исходного материала, из которого в дальнейшем формируются горные породы.

Исходный материал породы — осадки — по своему строению, составу и свойствам весьма существенно отличаются от горной породы. Чтобы превратиться в породу, осадок должен претерпеть весьма сложные и глубокие изменения.

Процессы превращения осадка в горную породу и дальнейшего ее изменения в верхней зоне земной коры объединяют под названием *диагенеза*. Различают две стадии диагенеза: *диагенез осадка*, или *ранний диагенез*, и *диагенез породы* — *эпигенез*, или *поздний диагенез*.

Термином «диагенез осадка» принято обозначать все изменения, которые претерпевает осадок до перекрытия его мощной толщей новых отложений или до резкого изменения среды, в которой происходит накопление осадка (осушение водного бассейна, изменение солености воды, ее температуры).

Осадконакопление. Накопление осадка происходит путем переноса и отложения продуктов выветривания различными агентами. Одним из главных агентов является вода. Значительное участие в накоплении осадков принимают воздух, животные и растительные организмы. Естественно, что состав осадков зависит от состава исходного материала, т. е. от характера пород области сноса. Так, если в области сноса распространены граниты, то и в ближайший бассейн будут сноситься продукты выветривания гранитов — обломки гранита, песок, а из области распространения глинистых сланцев — продукты разрушения сланцев — щебенка сланцев, глины. Таким образом, уже в составе сносимого материала заложены в известной мере состав и особенности будущей породы. Однако влияние исходного материала на состав будущей породы не является решающим, так как в дальнейшем сносимый материал претерпевает весьма существенные изменения, коренным образом меняющие его первоначальный облик.

Отложение осадков, как уже было сказано выше, происходит из водной или воздушной среды. Наиболее распространены в природе водные отложения (субаэральные). Они разделяются на морские, лагунные, озерные, речные, или аллювиальные, пролювиальные, флювиогляциальные и болотные.

Отложения воздушной среды (субаэральные) — эоловые, гравитационные, элювиальные и др. — распространены значительно меньше, чем водные.

Процессы осадконакопления носят циклический характер. Вначале осадки сносятся временными и постоянными потоками и отлагаются в виде пролювия и аллювия, затем выносятся в море, подвергаются уплотнению, цементации, опускаются на большие глубины и покрываются толщами других осадков и т. д., а затем они могут быть выведены на поверхность Земли, вновь размываться, перевеваться ветром, выноситься в реки и моря и т. д. Естественно, что все эти процессы в той или иной мере находят отражение в облике формирующейся породы. Так, например, если рекой размываются какие-либо мощные толщи морских песков, которые почти всегда отличаются хорошей сортированностью, то и в речных отложениях, образующихся из этого песка, будет отмечаться высокая степень сортировки, что для аллювиальных отложений не является характерным.

Большое значение имеет характер среды, в которой происходит отложение осадка. В эоловых отложениях может содержаться большое количество легкорастворимых минералов, например гипса; в морских отложениях первичного гипса не бывает; здесь он может накапливаться только в результате выпадения из водного раствора.

Теоретические вопросы диагенеза морских осадков впервые были разработаны Н. М. Страховым (1953). Он дал подробное объяснение многих явлений, происходящих при диагенезе глинистых осадков. Им установлено, что влажность первоначальных тонкодисперсных осадков (илов) достигает 100% и более. Воды осадков содержат большое количество различных растворенных веществ. Все это создает весьма благоприятную обстановку для развития бактерий и активных геохимических процессов. Если на глубине 20—25 см в слое осадка имеет место окислительная среда, то ниже она становится восстановительной. рН осадка всегда выше рН воды морского бассейна.

Так как обстановка в зоне накопления осадков по указанным выше причинам резко отлична от обстановки в слоях воды над осадками, последние попадают в новую для них обстановку, резко отличную от той, в которой они находились в водной среде. В результате процессов коагуляции образуются микроагрегаты, изменяется степень дисперсности осадка, т. е. изменяется гранулометрический состав его. Одновременно с этим происходят глубокие изменения минералогического состава осадка.

Одним из основных процессов диагенеза является процесс *дегидратации*. Он начинается с освобождения от свободной, а затем и физически связанной воды. Процесс дегидратации сопровождается уплотнением осадка, сближением частиц между собой и уменьшением пористости.

При выпадении осадков из водной среды большое влияние на характер отложений оказывает энергетическая мощность потока (объем воды и ее скорость), а также его характер (постоянный или

временный). В каждом из этих случаев отлагаются совершенно специфические осадки и по составу и по строению.

Многоводные постоянные горные потоки с большой скоростью течения откладывают крупнообломочный, хорошо окатанный и отсортированный материал: валуны, гальку, гравий; временные потоки откладывают крупнообломочный, малоотсортированный и слабо окатанный материал — камни, щебень, хрящ, дресву с большим количеством тонкого глинистого материала, заполняющего промежутки между крупными обломками. Равнинные реки с небольшой скоростью течения откладывают тонкозернистый материал — различной зернистости пески и илы. Для озерных бассейнов характерно отложение наиболее тонкого материала — илов.

В континентальных пресных бассейнах и водотоках преобладает отложение осадков, находящихся в воде во взвешенном состоянии, в морских и океанических бассейнах в осадок выпадают преимущественно вещества, находящиеся в растворенном состоянии, химических осадки.

Формирование осадочной породы протекает в течение длительного геологического времени. В этом процессе выделяется ряд стадий, каждая из которых влияет на состав и свойства породы.

М. В. Рац, рассматривая природу неоднородности горных пород, характеризует влияние различных стадий петрогенеза на формирование физических свойств горных пород (табл. 49).

Процесс формирования породы начинается со стадии осадконакопления. Осадок имеет в этот период весьма рыхлое сложение и характеризуется большим содержанием воды. После накопления осадка начинается *первая стадия диагенеза*. Она заключается в постепенном уплотнении осадка и во взаимодействии осевших частиц между собой и с окружающей средой, т. е. водой. Эти процессы приводят к изменению состава осадка. Часть неустойчивых минералов растворяется, появляются новые минералы. Состав новообразованных зависит во многом от характера среды: в резко восстановительной среде образуется пирит, в нормальной среде — глауконит.

Жизнедеятельность бактерий в молодых осадках вызывает появление сероводорода и обеднение осадка кислородом.

По мере накопления новых отложений более ранние осадки начинают терять непосредственный контакт со средой, отделяются от нее, наблюдается некоторая цементация осадка. Осадок теряет значительное количество воды и кислорода, приобретает небольшую связность. Начинается его затвердение, т. е. образование уже собственно породы.

Характерными особенностями этой стадии петрогенеза с инженерно-геологической точки зрения являются значительное уплотнение осадка и уменьшение пористости; уменьшение влажности; упрочнение осадка.

Уплотнение и упрочнение осадка достигаются не только вследствие перемещения частиц, т. е. более компактной укладки их, но и в результате процессов кристаллизации и цементации. При перекристаллизации мельчайшие зерна минералов превращаются в круп-

Стадии петрогенеза и их влияние на формирование свойств пород (по М. В. Рац) Таблица 49

Стадии петрогенеза	Основные процессы	Роль данной стадии в формировании свойств пород в массиве
Осадконакопление	Напластование. Формирование состава и мощности слоев, текстуры и структуры.	Возникновение первичной неоднородности и анизотропности как проявления структуры и текстуры пород в массиве
Диагенез	Частичное изменение состава, уплотнение, потеря влажности, частичная литификация, изменение мощностей слоев	Уменьшение пористости, уплотнение и спорадическая литификация. Первичное растрескивание
Дислокация и динамометаморфизм	Складчатость. Разрывы. Тектоническая трещиноватость, расслаивание	Дифференциация и усложнение форм залегания пород. Резкое увеличение неоднородности и изменение характера анизотропии (вторичная неоднородность и анизотропность)
Региональный метаморфизм	Уплотнение. Изменение вещественного состава, структуры и текстуры	Уменьшение степени неоднородности. Изменение характера анизотропии
Контактный метаморфизм и гидротермальная переработка	Изменение вещественного состава, иногда структуры и текстуры	Возникновение локальных зон с резко аномальными физическими свойствами
Разгрузка	Раздвижение блоков породы, разделение трещинами. Снятие естественного напряженного состояния. Возможно формирование новых трещин	Формирование и разрастание от дневной поверхности в глубину зоны повышенной сжимаемости и проицаемости
Выветривание	Изменение состава и всех свойств породы. Обычно разрушение структурных связей	Формирование и разрастание от дневной поверхности зоны разрушенных пород. Проницаемость сперва возрастает, затем падает. Показатели прочностных и деформационных свойств снижаются
Инженерная деятельность человека	Цементация, дробление, высушивание, обводнение, замораживание, оттаивание	Целенаправленное или побочное изменение любых свойств пород

ные зерна; одновременно происходит упорядочение их расположения и образование таких структур, где зерна породы вплотную прижимают друг к другу. Естественно, что в результате этого происходит значительное упрочнение породы.

Цементация характерна главным образом для обломочных отложений. Накопление цемента между зернами может происходить как одновременно с осаждением зерен (первичный цемент), так и позднее, в любую стадию формирования породы (вторичный цемент). Состав цемента оказывает решающее влияние на свойства пород. Наиболее прочным является кварцевый цемент, менее прочным — карбонатный и весьма слабым — глинистый цемент.

Мощность зоны диагенеза, по данным одних исследователей, достигает десятков метров, по данным других, — единиц метров. В. Д. Ломтадзе считает, что зона диагенеза не превышает 10—15 м.

Дальнейшие процессы диагенеза сформировавшейся породы (или *эпигенез*) совершаются уже на глубинах порядка многих сотен метров от поверхности, под большим давлением и при высокой температуре. Процессы эти по существу представляют собой процессы приспособления породы к новым условиям существования.

Главным процессом эпигенетического изменения породы является резко выраженное всеобщее уплотнение пород, отжимание воды (дегидратация), окаменение, значительное уменьшение пористости и, как следствие, дальнейшее повышение прочности.

Грубообломочный материал (галечниковый, щебнистый, песчаный) претерпевает незначительные диагенетические изменения. Они заключаются главным образом в более компактной укладке исходного материала в результате перемывания, измельчения его, изменения формы обломков (окатывание). Литологические изменения этого типа осадков связаны главным образом с заполнением промежутков между отдельными обломками глинистым материалом (заполнителем), а иногда и с процессами цементации.

Метаморфизм. При погружении на значительные глубины (порядка 10 км) породы попадают в зону метаморфизма. Под *метаморфизмом* принято понимать те существенные изменения горных пород, которые происходят под влиянием эндогенных процессов в земной коре. Метаморфизации подвергаются как магматические, так и осадочные горные породы. Основными факторами метаморфизма являются характер исходных пород, высокое давление, измеряемое десятками и сотнями тысяч атмосфер, и высокая температура.

Метаморфизм может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на прочность пород. Под положительным влиянием следует понимать такое направление метаморфизма, которое приводит к увеличению прочности породы; под отрицательным — уменьшение прочности пород, т. е. ослабление структурных связей.

Так, значительно повышается в процессе эпигенеза и метаморфизма прочность глины и песка по мере погружения их на значительные глубины. Превращения этих пород можно представить в виде следующих схем:

1. Глина → сланцеватая глина → глинистый сланец → филлит → серицитовый сланец → слюдяной сланец → сланцеватый гнейс.

2. Рыхлый кварцевый песок → плотный кварцевый песок → слабо сцементированный песчаник → прочно сцементированный кварцевый песчаник → сливной кварцевый песчаник (кварцит).

Примером отрицательного влияния метаморфизма является превращение прочных монолитных пород — гранитов — в гнейсы, поддающиеся рассланцеванию, характеризующиеся анизотропностью свойств и значительно меньшей прочностью по сравнению с гранитами.

Выветривание

Будучи выведенными на поверхность Земли или на небольшую глубину от поверхности, горные породы попадают в зону интенсивного влияния экзогенных процессов и подвергаются выветриванию.

Под *выветриванием* понимают процесс изменения горных пород под влиянием механического, физического и химического воздействия на них различных агентов выветривания. Основными агентами выветривания являются вода, кислород, углекислота, солнечная радиация (в основном колебания температуры), животные и растительность.

Под влиянием выветривания происходят коренные изменения пород. Обычно эти изменения выражаются в разрушении и разложении горных пород с потерей прочности. Разрушение горных пород сопровождается накоплением продуктов выветривания, которые являются исходным материалом для последующего сноса, осадконакопления и формирования новых пород.

Толщи пород, измененные в результате процессов выветривания, называют *корой выветривания*. Кора выветривания может быть современной, залегающей с поверхности Земли и близко от нее, или древней — погребенной, образовавшейся в отдаленные геологические периоды, перекрытые затем более молодыми по возрасту породами. В большинстве случаев наиболее молодой и самой верхней корой выветривания являются почвы.

Так как при осуществлении инженерных мероприятий мы имеем дело обычно с верхней частью толщи горных пород, залегающих с поверхности Земли или сравнительно неглубоко от нее, т. е. в зоне выветривания, то естественно, что процессы выветривания представляют большой практический интерес при оценке физико-механических свойств горных пород.

Выветривание приспосабливает вещество материнских пород к существованию на поверхности Земли или вблизи от нее в условиях низких температур, низкого давления и обилия кислорода и воды. В результате выветривания из материнской породы получают новые образования, качественно отличные от исходной породы, устойчивые на поверхности Земли.

Выветривание, как правило, сопровождается увеличением объема породы, ее раздроблением, разрыхлением, увеличением удельной поверхности.

Внешними и наиболее четкими признаками выветривания породы служат посветление породы, появление пятнистой окраски, бурых натеков и корочек ожелезнения на стенках трещин, натеки в пустотах, иногда присутствие гипса.

Характерными процессами выветривания являются: а) накопление в выветривающихся породах тонкораздробленного коллоидного материала; б) появление новых минералов; в) увеличение трещиноватости и пористости пород; г) полное или частичное уничтожение связей, существовавших между частицами пород; д) гидратация, т. е. связывание в продуктах выветривания большого количества воды; е) накопление органического вещества в результате жизнедеятельности организмов.

Прочность породы при выветривании, как уже было сказано выше, обычно уменьшается пропорционально степени выветрелости. В то же время в процессе выветривания могут происходить и противоположные процессы — увеличение прочности (например, превращение песков в песчаники в результате процессов отложений солей — цементации). Однако эти процессы наблюдаются значительно реже, чем раздробление и уменьшение прочности.

Процессы выветривания протекают в обычных для поверхности Земли термодинамических условиях — при низких температурах и атмосферном давлении.

Давление на поверхности Земли колеблется около 1 атм. В горных областях оно несколько снижается, на глубине от поверхности Земли и под водой — повышается. Давление и его колебания сказываются на степени растворимости пород, изменении равновесия системы вода — газ (при увеличении давления возрастает растворимость газов) и изменении скорости и характера химических реакций.

Температура на поверхности Земли подвержена суточным, сезонным, годовым и вековым колебаниям. Амплитуда суточных и сезонных колебаний сравнительно невелика. Колебания температур наблюдаются и на небольшой глубине от поверхности Земли. На глубине около 30 м располагается зона постоянной температуры.

Вековые колебания температуры связаны с длительными изменениями климатических условий. Такие колебания происходят при материковых оледенениях, трансгрессии моря и т. д. Они приводят к коренным изменениям свойств и состояния пород. Например, оледенение четвертичного периода вызвало промораживание пород, в результате которого даже самые слабые водонасыщенные породы были превращены в твердые, прочные породы, сохраняющие эти свойства при температурах ниже 0° С.

Колебания температуры сказываются прежде всего на скорости химических процессов. При повышении температуры на 10° С она удваивается или утраивается.

Температура влияет на растворимость газов: чем меньше темпе-

ратура, тем больше растворимость газов в воде. Так, например, растворимость углекислого газа при повышении температуры до 20° С уменьшается в 2 раза, а до 45° С — в четыре раза по сравнению с растворимостью при 0° С. Вода же в зависимости от содержания в ней газов имеет различную химическую активность.

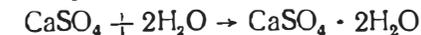
Колебания температуры вызывают изменения объема минералов, причем эти изменения различны у разных минералов, в результате чего полиминеральные породы при частом изменении температуры быстро разрушаются.

Основным источником колебаний температуры является лучистая энергия Солнца.

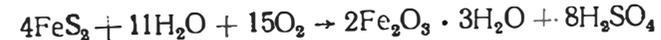
Атмосферная вода как универсальный растворитель является одним из активнейших агентов выветривания. Кроме того, ее присутствие усиливает, а иногда и полностью обуславливает действие других агентов выветривания — кислорода и углекислоты. Передвигаясь в породах, вода вызывает разнообразные механические, физические и химические явления и реакции, приводящие к разрушению и изменению горных пород. Особенно активна вода на поверхности Земли и вблизи ее, где она обладает большой скоростью движения, слабо минерализована и насыщена углекислотой и кислородом. На глубине вода теряет кислород и углекислоту, насыщается солями и в значительной мере теряет свою активность.

Действие воды на породы выражается главным образом в гидратации, гидролизе, растворении и механическом разрушении.

Гидратация — поглощение породой воды — может происходить без изменения минералогического состава и с образованием новых минералов. Характерной реакцией первого типа является поглощение воды породой с цеолитными минералами или коллоидными частицами (например, монтмориллонитом). Примером реакции второго типа является образование гипса из ангидрита:



Гидролиз — реакция расщепления солей с выделением свободной кислоты под влиянием воды. Например, окисление сульфидов с образованием лимонита и выделением свободной серной кислоты:



Растворение заключается в переходе твердого вещества породы в водный раствор.

Двигающаяся на поверхности вода оказывает *механическое воздействие* на породы — размывает их, раздробляет, измельчает, окатывает обломки и т. д.

Кислород легко проникает в породы зоны аэрации, т. е. в толщу пород, расположенную между поверхностью Земли и уровнем грунтовых вод. Ниже уровня грунтовых вод кислород находится в растворенном в воде состоянии, но содержание его быстро падает с глубиной. Ниже определенной границы (окислительно-восстановительной зоны) кислород отсутствует. Выше этой границы происходят окислительные процессы, ниже — восстановительные. В окислительной зоне кислород переводит закисные соединения в окисные,

иногда с выделением свободных кислот, которые усиливают разрушение пород. В связи с появлением окисных соединений железа породы приобретают желтые, бурые и красные цвета. Многие вновь образующиеся минералы выносятся водой. Это увеличивает пористость пород, нарушает связи и приводит к увеличению объема, разрыхлению породы.

В условиях поверхности *углекислота* активнее кремнекислоты и вытесняет последнюю. Основными процессами выветривания, в которых участвует углекислота, являются следующие: 1) разложение и выщелачивание силикатов и алюмосиликатов, сопровождающееся выносом катионов и кремнекислот; 2) образование углекислых, двууглекислых и других солей, которые частично выносятся из породы водой, частично выпадают в осадок; вынос солей ослабляет прочность пород, выпадение осадка создает вторичные связи между частицами породы и повышает ее прочность; 3) растворение карбонатов — образование карстовых пустот, ослабляющих породы и увеличивающих их водопроницаемость.

Действие высших организмов не распространяется на большую глубину. Однако их влияние на выветривание горных пород значительно. Особенно сильное влияние на выветривание пород оказывает хозяйственная деятельность человека. Распашка сельскохозяйственных полей, орошение земель, внесение удобрений, прокладка дорог, устройство водохранилищ, горные разработки и пр. — все это изменяет природную обстановку и вызывает процессы почвообразования, разрушения и выветривания пород. Однако наиболее интенсивное влияние на породы оказывают животные и растения. Корневая система растений участвует в механическом раздроблении породы, при этом следует отметить, что корневая система отдельных видов древесных растений проникает на десятки метров в глубину поверхности Земли.

Роющие живые организмы (черви, суслики, мыши и др.) также разрыхляют породы. Ходы землероев являются путями проникновения в породу воды и воздуха. Однако, как и растительность, влияние этих организмов ограничивается самой верхней частью земной коры. В отличие от них микроорганизмы проникают на глубины свыше 1 км. Одни из них участвуют в окислительных процессах, другие — в восстановительных; одни освобождают нитраты и сульфаты, другие — их связывают, вызывая сложные химические изменения в породах.

Все агенты выветривания действуют совместно, часто в разных направлениях, создавая сложную обстановку и вызывая сложные изменения в горных породах.

По характеру процессов, происходящих в породах, и действующим агентам обычно различают физическое и химическое выветривание.

Физическое выветривание выражается в непосредственном раздроблении и разрушении породы, которое влечет за собой уменьшение ее прочности, устойчивости в откосах и увеличение водопроницаемости.

Основными факторами, обуславливающими физическое выветривание, являются: 1) колебания температуры и связанное с этим оттаивание и замерзание пород и воды в них; 2) увлажнение и высушивание; 3) жизнедеятельность организмов; 4) механическое воздействие ветра; 5) размывающая деятельность поверхностных вод; 6) хозяйственная деятельность человека.

Физическое выветривание особенно развито в областях с холодным или сухим и жарким климатом. Особенно интенсивно оно развивается в пустынном жарком климате, где суточные колебания температуры достигают 60—70° С.

Различия в коэффициенте теплового расширения различных минералов приводят под влиянием высоких и низких температур к различному увеличению и уменьшению объема минералов, слагающих породу. Это ослабляет связи в породе, вызывает образование трещин и раздробление.

Характер и интенсивность разрушения породы зависят от состава породы, ее структуры и текстуры.

Быстрее разрушаются полиминеральные породы, особенно разнотельные и крупнотельные. Мелкотельные однородные породы разрушаются менее интенсивно.

В результате физического выветривания образуются осыпи, курумы и другие скопления рыхлого обломочного материала. Глубина физического выветривания невелика и, по-видимому, не превышает 10—15 м.

Химическое выветривание протекает особенно интенсивно в областях с влажным жарким климатом. Основными агентами химического выветривания являются вода, кислород и углекислота. Суть химического выветривания заключается в разложении силикатов и алюмосиликатов (гидратация, гидролиз, окисление, карбонатизация), взаимодействии и выпадении в осадок продуктов разложения минералов в виде окислов, гидроокислов и простых солей, устойчивых в коре выветривания, и, наконец, в растворении и выносе простых солей кальция, магния, натрия и калия. Эти процессы в большинстве случаев вызывают ослабление прочности пород, разрушают их, и лишь процессы отложения солей железа, кремневой кислоты и других приводят к увеличению прочности вследствие цементации.

Характерной особенностью химического выветривания является образование большого количества тонкораздробленных — коллоидных — продуктов выветривания и вторичных глинистых минералов, которые резко изменяют свои свойства при изменении внешней среды. Они легко впитывают воду, что приводит к разбуханию и размоканию глинистых пород.

В процессе химического выветривания часто появляются кислые продукты выветривания, разрушающие металл и бетон сооружений.

Химическое выветривание, слабо проявляющееся в начальных стадиях выветривания, постепенно усиливается по мере увеличения степени раздробления и разрыхления пород под влиянием агентов физического выветривания.

Характер процессов химического выветривания и состав конечных продуктов этих процессов зависят от окружающей среды и петрографического состава пород. В тропических областях оно в несколько раз интенсивнее, чем в сухих и холодных областях. Если физическое выветривание проявляется во всех без исключения породах, то химическое выветривание особенно сильно проявляется в таких породах, которые образовались в иных термодинамических условиях, нежели те, в которых они оказались позднее в результате эндогенных и экзогенных процессов. Поэтому в магматических и метаморфических породах зона химического выветривания простирается много глубже от поверхности Земли, чем в осадочных. Процессы химического выветривания магматических пород приводят к коренным изменениям пород. Например, прочный твердый гранит превращается в мягкую пластичную породу — каолин.

Из осадочных пород наиболее стойки в отношении процессов химического выветривания песчаники, особенно кварцевые с кремнистым цементом. Менее стойки карбонатные породы, которые могут при определенных условиях даже растворяться в воде. Еще менее устойчивы галоиды.

Степень выветрелости пород уменьшается с глубиной. Наблюдается вертикальная зональность коры выветривания. Это имеет большое практическое значение при оценке инженерно-геологических условий строительства различных сооружений.

И. И. Гинзбург в зависимости от преобладающих процессов выветривания выделяет следующие *зоны коры выветривания* (сверху вниз).

В самой верхней зоне, начинающейся с поверхности Земли, — *зоне окисления*, развиваются процессы окисления и заканчиваются процессы гидролиза. Здесь накапливаются конечные продукты разложения: гидроокислы железа, марганца и титана, а в субтропиках и тропиках — алюминия.

Ниже следует *зона гидролиза*, конечного выщелачивания и начала окисления; здесь силикаты полностью освобождаются от щелочей и щелочных земель, начинают распадаться на гидроокиси и кремнекислоту, минералы закиси железа частично окисляются, происходит предельное накопление водных силикатов глинозема и железа (глинистых минералов).

Далее следует *зона выщелачивания*, где происходит главным образом выщелачивание оснований силикатов и кончается гидратация минералов. Это зона промежуточных продуктов выветривания.

Еще ниже расположена *зона гидратации*, где образуются гидрослюда и гидрохлориты, это главным образом зона развития начальных продуктов выветривания — глыбовая, щебенчатая.

Зональность коры выветривания наиболее отчетливо проявляется в магматических породах. В осадочных породах следы выветривания и зональности макроскопически определяются довольно четко в твердых, плотных разностях этих пород, таких как известняки, песчаники, алевроиты. В песках и глинах зональность макроскопически выявляется трудно.

Основными вопросами инженерно-геологического изучения процессов выветривания являются следующие:

1. Исследование характера и степени раздробленности пород по зонам, мощности по зонам и общей мощности выветривания пород на различных геоморфологических элементах, площадное распространение выветрелых пород.

2. Изменение состава и физико-механических свойств при выветривании пород по зонам.

3. Скорость выветривания пород при вскрытии их горными выработками и строительными котлованами.

4. Изменение интенсивности и характера процессов выветривания пород в зависимости от геологической структуры, местных гидрогеологических, геоморфологических, климатических и других условий.

Все перечисленные вопросы должны решаться полевыми и лабораторными методами при производстве инженерно-геологических съемок и изысканий на конкретных объектах.

Н. В. Коломенский предложил выделять следующие зоны выветривания (снизу вверх):

1. *Монолитная зона*. В этой зоне породы слабо затронуты процессами выветривания. Они не имеют видимых признаков дробления. Физико-механические свойства их отличаются от физико-механических свойств материнских пород лишь небольшим ослаблением связей между частицами, следствием которого является понижение сопротивления сдвигу и сжатию.

2. *Глыбовая зона*. Для этой зоны характерны трещины выветривания, разбивающие массив на отдельные глыбы. Химико-минералогический состав пород этой зоны почти не отличается от состава материнских пород, но физико-механические свойства значительно отличаются от физико-механических свойств пород монолитной зоны. Особенно изменяются водопроводящие свойства. Коэффициенты фильтрации достигают сотен метров в сутки. Сопротивление сдвигу и сжатию продолжает уменьшаться.

3. *Мелкообломочная зона*. Материнская порода представляет собой скопление обломков, промежутки между которыми заполнены тонкодисперсным материалом — вторичными глинистыми минералами. Фильтрационные свойства пород, а также сопротивление сдвигу и сжатию резко снижаются по сравнению с глыбовой зоной.

4. *Зона тонкого дробления*. В этой зоне порода превращена в тонкодисперсную массу, состоящую из вторичных минералов выветривания. Первичные минералы материнской породы встречаются лишь в виде включений тонкораздробленных частиц. Порода становится практически водонепроницаемой, резко увеличивается сжимаемость, появляется сцепление (связность), но общее сопротивление сдвигу уменьшается, порода под влиянием воды резко меняет свои свойства, появляется пластичность, набухание, размокание.

Ю. Д. Матвеев, изучая выветривание пород в районе строительства Братской ГЭС, расчленил кору выветривания на четыре зоны (табл. 49).

Схема расчленения коры выветривания алевролитов братской свиты ордовика (Оь)

Зона	По преобладающим процессам	По степени раздробленности пород	Глубина, м
IV	Зона ежегодного промерзания — протавания при очень больших (7—17° на метр) градиентах температур и очень больших годовых колебаниях температур (>12—15°) и влажности (до 10—15%) пород, интенсивного развития процессов почвообразования	Суглинки буровато-коричневые с бурыми пятнами ожелезнения, с включением дресвы и щебня	0,8 0,6—1,5
III ²	Зона ежегодного промерзания — протавания при больших градиентах температур (2—7° на метр) и больших годовых колебаниях температур (>3—6°) и влажности (5—10%) пород, развития процессов окисления, гидратации и выщелачивания	Щебень тонкослоистых алевролитов размером до 2—3 см и толстослоистых — до 5—7 см, с суглинистым заполнителем в промежутках	3,1 2,4—3,7
III ¹		Щебень тонкослоистых алевролитов размером 3—10 см и толстослоистых — до 5—20 см, с прослоями и гнездами дресвы и суглинок. Текстурные признаки породы не прослеживаются	
II	Зона спорадического промерзания при малых градиентах температур (1—2° на метр) и незначительных годовых колебаниях температур (>2—3°) и влажности (1—5%) пород, развития процессов гидратации	Алевролиты, разбитые трещинами выветривания на щебень и глыбы: тонкослоистые размером до 10—20 см, толстослоистые — до 10—30 см. Трещины закрытые, реже открытые шириной до 2—3 мм, редко до 1—2 см, заполненные суглинком	4,2 3,3—5,0
I	Зона крайне незначительных годовых колебаний температур (0—2°) и практически постоянной влажности, начала гидратации	Алевролиты, разбитые литогенетическими трещинами, преимущественно закрытыми, разделяющими породу на отдельные блоки размером 30—50 см и более. Легко раскалываются по ослабленным в результате выветривания плоскостям	8,5 8,0—10,0
0	Зона вековых колебаний температур и влажности	Алевролиты без следов выветривания	

Большое значение для оценки влияния процессов выветривания горных пород на инженерно-геологические условия строительства сооружений имеет определение скорости развития процессов выветривания пород, вскрываемых горными выработками и строительными котловинами. Скорость выветривания разных пород различная. Некоторые осадочные породы выветриваются в течение нескольких дней после вскрытия их выемками и котловинами; другие, главным образом магматические породы, выветриваются весьма медленно.

Изучением скорости выветривания осадочных пород на различных объектах занимались многие специалисты. Данные этих наблюдений, обработанные Ю. Д. Матвеевым (1970) применительно к скорости увеличения мощности III и IV зон, приведены в табл. 51.

Как видно из данных таблицы, скорость выветривания различных пород изменяется от нескольких сантиметров до 1,5 м/год.

Изменение состава и свойств пород изучается путем определения минералогического, гранулометрического состава и физико-механических свойств в полевых и лабораторных условиях параллельно на образцах выветрелых и невыветрелых пород и сравнения результатов этого изучения.

Г. С. Золотарев (1969) предлагает оценивать степень выветривания по показателю B_c :

$$B_c = \frac{F_O - F_A}{F_H - F_A},$$

где F — показатель какого-либо свойства породы разной степени выветривания, A — максимально выветрелой породы, соответствующей зоне тонкого дробления по Н. В. Коломенскому; O — оцениваемой породы; H — невыветрелой породы.

Выбор показателя для характеристики выветрелости породы зависит от ее петрографического типа, трещиноватости и возможности выполнить те или иные определения.

В. Б. Швец (1963) предлагает характеризовать выветривание пород, дающих крупнообломочный элювий, коэффициентом выветрелости, который определяется по формуле:

$$K_v = \frac{K_i - K_0}{K_i},$$

где K_i — максимально возможная степень раздробленности обломков при их истирании в течение i мин вращения изучаемой породы в барабане; K_0 — природная степень раздробленности обломков изучаемой породы.

Степень раздробленности определяется по данным анализа на ситах путем вычисления отношения веса обломков размером менее 2 мм к весу обломков размером более 2 мм как до начала испытаний в барабане, так и после них.

Испытанию подвергается образец крупнообломочного элювия весом 2 кг в специальном барабане, вращаемом со скоростью 50—70 об/мин в течение 20 мин. Оценка выветрелости породы производится по табл. 52.

Скорости выветривания осадочных пород

Климатическая область	Район	Породы	Скорость, м/год	Автор
Континентальная пустынная	Мингечаурская ГЭС г. Сулюкта	Глины	До 0,50	Н. В. Коломенский С. В. Дроздов В. Г. Негусторов
		»	0,60	
Атлантическая и Западно-Сибирская континентальные степные	г. Волгоград	»	0,21	Н. С. Реутова З. А. Макеев С. А. Балытер
	Предкавказье г. Кустанай	»	0,50 0,60	
Атлантическая континентальная лесная	Поволжье »	Глины	0,25—0,52	С. Д. Воронкевич Г. С. Золотарев
		»	0,34	
Северо-кавказская горная	Грузия	»	До 0,30	Э. А. Джавахишвили
Атлантическая континентальная лесная	Поволжье Воткинская ГЭС	Глины алевролитовые, P ₂ Аргиллиты, P ₂	до 0,07 0,35	С. Д. Воронкевич Д. П. Прочухан
		»	»	
Западно-Сибирская континентальная лесная	г. Назарово	Алевролиты	0,35—0,45	Ю. Д. Матвеев
Восточно-Сибирская континентальная лесная	Иркутская ГЭС г. Чита г. Братск	Алевролиты слабые	1,15—1,50	В. А. Емельянова Ю. Д. Матвеев М. Е. Иванов, Т. С. Храмогина, Н. Н. Леонтьев
		Алевролиты	0,16	
		Алевролиты толстослонистые, O	0,25	
		Алевролиты тонкослонистые	0,30	

Некоторые выводы по процессам формирования физико-механических свойств осадочных пород

В процессе формирования физико-механических свойств осадочных пород наблюдается некоторая цикличность. Первой фазой этого цикла является накопление осадков и превращение в горную породу. Второй фазой цикла следует считать диагенез породы,

Показатели выветрелости пород (по В. Б. Швецу)

Породы	Коэффициент выветривания K_v	Оценка прочности обломков по сопротивлению разламыванию в состоянии природной влажности
С прочными обломками	$K_v < 0,50$	Не разламываются руками
С рыхловатыми обломками	$0,50 \leq K_v \leq 0,75$	Разламываются руками, но не растираются
С глинистыми обломками	$0,75 < K_v < 1,0$	Растираются руками и размокают в воде

т. е. изменения, связанные с уплотнением породы и ее литификацией. К третьей фазе цикла относятся изменения, связанные с метаморфизмом. Причем эта фаза может иногда выпадать из цикла. Четвертой и последней фазой цикла являются изменения породы в зоне выветривания, накопление продуктов выветривания, служащих материалом для нового цикла формирования пород.

В магматических породах вторая фаза выпадает, а к первой относятся процессы кристаллизации (затвердения) магмы. Далее следуют фазы метаморфизма и выветривания.

Процессы выветривания — важнейший фактор формирования инженерно-геологических свойств пород самой верхней части земной коры, т. е. той части земной коры, с которой больше всего связана инженерно-строительная деятельность человека. Все изменения, которые претерпевают породы в процессе выветривания, можно объединить в следующие группы: а) дробление, б) цементация, в) разложение первичных минералов, г) образование вторичных минералов, д) увлажнение или высушивание.

Изменения породы сопровождаются существенным изменением их физико-механических свойств. Как правило, выветривание снижает прочность пород. Однако в отдельных случаях в коре выветривания может происходить увеличение прочности пород за счет цементации рыхлых продуктов выветривания.

С инженерно-геологической точки зрения, важнейшим результатом процессов выветривания является накопление в коре выветривания тонкораздробленного материала — коллоидов, которые определяют основные свойства и поведение под сооружениями глинистых пород, характеризующихся большим распространением в земной коре и весьма изменчивыми свойствами.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризовать основные стадии формирования осадочной породы, типичные для этих стадий процессы.
2. Метаморфизм пород и его влияние на изменение свойств магматических и осадочных горных пород.

3. Основные агенты выветривания и их роль в процессах выветривания.
4. Особенности физического и химического выветривания горных пород и общая направленность этих процессов.
5. Зоны выветривания и изменения свойств пород в этих зонах.

Литература

- Золотарев Г. С. О скорости выветривания глинистых пород Ульяновского Поволжья. — Науч. доклады высшей школы, 1958, № 3.
- Коломенский Н. В., Комаров И. С. Инженерная геология. М., «Высшая школа», 1964, гл. 5.
- Коломенский Н. В. Методические указания по изучению процессов выветривания. М., Госгеолгиздат, 1963.
- Приклонский В. А. Грунтоведение. М., Госгеолтехиздат, 1955, гл. 1 и 2.

ЗНАЧЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ДРУГИХ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ГОРНЫХ ПОРОД

Инженерно-геологические свойства горных пород кроме генезиса и условий преобразований, которые они претерпевают в течение всей своей истории, зависят также от других геологических факторов и прежде всего от минералогического состава породы, ее структуры и текстуры, возраста пород, гидрогеологических условий и природной обстановки, в которой находится порода.

Из всех перечисленных факторов в настоящей главе рассмотрим влияние возраста пород, условий залегания, гидрогеологических условий и природной обстановки. Минералогический состав, текстуры и структуры охарактеризованы ранее.

Возраст пород. Возраст пород (некоторых групп) оказывает большое влияние на их состояние и свойства. Это влияние прежде всего связано с тем, что в течение всей геологической истории той или иной породы необратимо изменялись условия ее существования. Рыхлые осадочные породы под влиянием медленных эпейрогенических движений земной коры опускались на большие глубины, где под влиянием высокой температуры и давления превращались в компактные твердые породы.

Даже если порода и не претерпела процессов метаморфизма, она изменяется, находясь длительное время под давлением мощных толщ более молодых осадков. Порода уплотняется, происходят процессы упрочнения связей, перекристаллизации, литификации — окаменения. Поэтому в целом наиболее древние осадочные породы обладают большей прочностью, чем более молодые отложения. Следует иметь в виду, что вследствие большого количества факторов, влияющих на формирование свойств пород, в природе часто наблюдаются отклонения от указанной выше общей закономерности. Довольно часто более древние породы бывают менее прочными, обладают менее благоприятными инженерно-геологическими свойствами, чем более молодые. Так, например, среди прочных и весьма плотных глин девонского возраста встречаются прослойки весьма слабых, мягких пластичных глин, которые по своим основным инженерно-геологическим показателям (сжимаемость, сопротивление сдвигу) менее благоприятны, чем более молодые глины татарского яруса перми и даже моренные суглинки антропогенного возраста. Рыхлые плавунные пески встречаются в отложениях мела, юры и более древних. В то же время весьма плотные пески можно встретить

среди более молодых неогеновых и даже антропогенных отложений.

Таким образом, возраст породы безусловно является важным фактором, определяющим «прочность» породы. Наблюдающиеся отклонения зависят от всей геологической истории породы: условий отложения, мощности перекрывающих ее отложений, биохимических процессов, обуславливающих накопление органического вещества и газов, характера циркулировавших в породе растворов и пр.

Условия залегания пород. Условия залегания оказывают влияние на оценку инженерно-геологических свойств пород в массиве, на оценку возможного их поведения при взаимодействии с сооружением, на оценку устойчивости их в естественных условиях и под сооружением.

При лабораторных исследованиях физико-механических свойств пород, выполняющихся на небольших образцах, не могут быть учтены особенности пород в массиве, в естественных условиях залегания, особенно такие, как наклон пластов, неоднородность состава, трещиноватость, наличие ослабленных зон, прослоев более слабых пород и т. д. Они могут быть выявлены и изучены только при комплексном исследовании породы в полевых условиях в массиве при инженерно-геологической съемке и в лаборатории на образцах, отобранных из отдельных точек массива, с учетом всех особенностей строения и условий залегания породы.

При оценке условий залеганий следует всегда учитывать характер будущего сооружения. Так, например, при возведении промышленных и жилых зданий на слоистых наклоннозалегających пластах азимут и угол падения пластов в равнинных условиях не оказывают влияния на инженерно-геологическую оценку условий строительства. При строительстве этих же сооружений вблизи косогоров и на склонах возвышенностей падение пластов уже необходимо учитывать, так как при наличии в толще таких пород слабых глинистых прослоев, имеющих падение в сторону склона, могут возникнуть оползневые подвижки.

При оценке условий строительства водонапорных плотин в условиях слоистой толщи водопроницаемых пород необходимо определять азимут падения пластов. Падение пород в сторону нижнего бьефа или в сторону параллельной долины может привести к большим утечкам воды из водохранилища.

Наиболее благоприятны для строительства сооружений мощные покровы эффузивных пород или крупные интрузивные тела. Залегание магматических пород в виде жил, даек и других тел, небольших в плане, менее благоприятно, так как в таких случаях возможна частая смена пород, различного состава и с разными свойствами. С такой же обстановкой можно встретиться при строительстве на линзовиднозалегających осадочных породах или на слоистой толще пород, падающих под большими углами или поставленных на «голову».

Одновозрастные и одинаковые по составу породы в зависимости

от тектонической нарушенности могут характеризоваться совершенно различными физико-механическими свойствами.

В платформенных условиях обычно встречаются мощные осадочные толщи, сложенные породами с жесткими связями (песчаники, известняки, доломиты), а также сыпучие (пески) и связные породы (глины). Среди этих пород можно встретить слабоуплотненные глины, пластичные, сильносжимаемые, а также рыхлые водоносные пески, находящиеся в пловунном состоянии. В сильно дислоцированных горных областях все породы независимо от возраста сильно уплотнены, отличаются повышенной прочностью и отсутствием пластичных и рыхлых разностей. В то же время под влиянием тектонических движений в шарнирах складок породы сильно трещиноваты и раздроблены. В зонах разрывных нарушений самых прочных пород встречаются перетертые милонитизированные породы также пониженной прочности.

Гидрогеологические условия. Гидрогеологические условия (характер подземных вод, циркулирующих в горных породах, их химический состав, температура, наличие и состав растворимых газов, наличие напора, скорость движения) оказывают сильное воздействие на горные породы, меняют их состав, плотность сложения, консистенцию, степень цементированности и другие показатели их состояния и свойств. Особенно велико это влияние на осадочные горные породы, а среди них — на глинистые породы, тонкие пески и цементированные породы, содержащие легко растворимые соли.

Обводненность — одна из основных причин снижения прочности пород вследствие размягчения, перехода в пластичное состояние или выщелачивания легко растворимых солей, а также уменьшения устойчивости пород и перехода в подвижное состояние (сплывы, оползни, пловуны). При большой скорости передвижения подземная вода размывает горные породы, ослабляет связи между частицами, выносит из породы мелкие частицы (суффозия), расширяет трещины и пустоты, снижая тем самым механическую прочность и устойчивость горных пород.

Другие природные факторы. Среди других природных факторов, влияющих на состояние и свойства пород, отметим геоморфологическую обстановку и климатические условия.

Состояние и свойства пород зависят во многом от приуроченности их к различным элементам рельефа. Так, глинистые породы, залегающие в пределах речных долин, оказываются в большинстве случаев менее плотными, чем на соседних участках водоразделов. В то же время лёссовидные породы, слагающие низкие террасы долин, обычно не обладают просадочными свойствами или же они проявляются в незначительной степени, а эти же породы на водоразделах, как правило, обладают большой просадочностью.

Карбонатные породы, залегающие ниже древнего и современного базисов эрозии, отличаются монолитностью сложения и отсутствием карстовых процессов. На таких же породах на склонах современных или древних погребенных долин развиваются современные карстовые процессы или имеются следы древнего карста.

Большое влияние на формирование пород оказывают климатические условия. Так, лёссовые породы, обладающие специфическими свойствами просадочности, формировались в условиях засушливого климата. Аллювиальные отложения, образующиеся в условиях избыточного увлажнения, характеризуются наличием торфа и слабой засоленностью. Этим же отложениям, но сформировавшимся в условиях засушливого климата, свойственно полное отсутствие торфа и высокая засоленность.

Климатические особенности накладывают свой отпечаток на окраску пород. Яркие красные и кирпичные тона характерны для тропического климата. Отложения областей холодного влажного климата имеют в большинстве случаев однообразные серые и бурые тона.

От климатических условий зависит степень интенсивности процессов выветривания, которые оказывают решающее влияние на формирование состава и инженерно-геологических свойств горных пород коры выветривания, т. е. той части земной коры, с которой больше всего связано массовое строительство.

Контрольные вопросы

1. Как сказывается возраст на инженерно-геологических свойствах пород?
2. Какое влияние оказывают подземные воды на состояние и свойства горных пород?
3. Какова роль сведений об условиях залегания пород при оценке их свойств?
4. Какое влияние оказывают климатические условия на формирование свойств горных пород?

При проектировании и строительстве сооружений возникает необходимость искусственного улучшения физико-механических свойств горных пород, если в естественных условиях породы либо не позволяют организовать строительные работы, либо не обладают необходимой прочностью, устойчивостью, водостойкостью или другими качествами, обеспечивающими рациональную конструкцию сооружения и его нормальную эксплуатацию на весь расчетный срок существования сооружения.

В Советском Союзе разработано и применяется в практике строительства много способов изменения свойств пород в строительных целях. Различные методы искусственного изменения свойств горных пород часто называют *стабилизацией* или *технической мелиорацией пород*. Последний термин с нашей точки зрения более правильно отражает направление работ по улучшению свойств пород.

Современные методы мелиорации пород позволяют придавать связность сыпучим породам, монолитность скальным породам, разбитым многочисленными трещинами; увеличивать прочность (окаменяемость) глинистых и песчаных рыхлых пород; уменьшать пыльность глинистых пород на дорогах; понижать водопроницаемость; повышать механическую прочность разнообразных пород; повышать морозоустойчивость, устойчивость против агрессивных подземных вод; повышать плотность рыхлых пород; изменять консистенцию глинистых пород; обеспечивать организацию строительных работ и др.

Выбор способа изменения свойств породы зависит от типа породы, гидрогеологических условий, типа сооружения и характера его взаимодействия с породой, экономических соображений.

Все существующие способы изменения свойств пород можно объединить в две группы. К первой группе относятся способы, которые обеспечивают коренное изменение свойств горных пород на длительный срок. Это цементация, силикатизация, битумизация, глинизация, термическая обработка, внесение различных добавок для укрепления пород при дорожном строительстве. Вторая группа объединяет способы, с помощью которых свойства пород изменяют на короткий промежуток времени, в основном на период производства строительных работ (способы замораживания и осушения).

Методы мелиорации пород, как уже было сказано, зависят от класса пород.

Способы мелиорации пород с жесткими связями

Цементация. Способ цементации применяется для уплотнения — уменьшения трещиноватости горных пород. В породе нагнетается под давлением цементный раствор, который, затвердевая в пустотах и трещинах породы, сообщает ей монолитность и водонепроницаемость.

Для нагнетания используют растворы из воды и цемента. Иногда в раствор добавляют песок или опилки и глину. Добавка глины до 10% от веса цемента дает хорошие результаты. Такой раствор обладает повышенным сопротивлением действию агрессивных подземных вод.

Весовое соотношение цемента и воды может быть от 1 : 10 до 1 : 1 в зависимости от удельного водопоглощения породы. Чем больше удельное водопоглощение породы, т. е. чем больше трещиноватость, тем больше цемента должно быть в растворе. При очень большой трещиноватости в раствор добавляют песок или мелкий гравий.

В сильно выветрелых породах при наличии в трещинах и пустотах большого количества глинистых продуктов выветривания цементации должна предшествовать промывка трещин чистой водой.

Промывка и последующая закачка глинистого раствора осуществляются через буровые скважины, закладываемые по контуру будущего сооружения или на площади, в пределах которой нужно создать монолитный массив горной породы. Количество скважин и расстояния между ними рассчитываются исходя из возможного радиуса влияния одной скважины. В ряде случаев цементации в производственном масштабе предшествует опытная цементация небольшого участка, в процессе которой получают данные для разработки проекта цементационных работ — определение количества скважин, глубины их, расстояния между скважинами, характера раствора, давления нагнетания и т. д.

Начинают цементацию обычно жидкими растворами (до 5% цемента от веса воды). Такой цемент легче проникает в мелкие поры и тем самым обеспечивает лучшую цементацию. Нагнетают его под небольшим давлением. Затем содержание цемента в растворе и давление постепенно увеличивают до проектного. При небольших глубинах цементации наибольшая величина давления должна быть определена по соотношению

$$\sigma = H \frac{\delta}{10},$$

где σ — наибольшее допустимое давление; $H \frac{\delta}{10}$ — давление от веса породы; H — глубина, на которой производится цементация; δ — объемный вес цементируемой породы.

При цементации на глубинах 20—40 м давление обычно не превышает 3—6 атм, на глубинах более 100 м предельное давление доходит до 200 атм (при проходке шахт).

Для нагнетания цементных растворов применяются обыкновенные плунжерные насосы с давлением до 150—200 атм и производительностью 10—30 м³/ч или специальные самоходные цементирующие агрегаты с резервуарами для приготовления цементного раствора.

При применении цементации необходимо учитывать следующее:

1. Пределом применения цементации являются породы с трещинами шириной не менее 0,2—0,15 мм, при удельном водопоглощении не менее 0,05 и не более 10 л/мин. Это ограничение связано с тем, что в мелкие трещины не проникает даже самый мелкий цемент, а в крупных полостях подземные воды, обладая большой скоростью, выносят цемент прежде чем он затвердеет.

2. В водоносных породах необходимо учитывать агрессивность подземных вод и на основании этой оценки подбирать марку цемента, гарантирующую надежность и долговечность цементации в данных гидрогеологических условиях.

Наименее устойчивы порландцемент. В агрессивных сульфатных водах устойчивы пуццолановый и глиноземистый цементы. При наличии в воде магния рекомендуется применять специальный магнезиальный цемент. Недостатком этого цемента является очень быстрое затвердение и высокая температура (до 150°С), развиваемая при схватывании цемента, которая вызывает его расширение, может привести к появлению в породе новых микротрещин. После охлаждения магнезиальный цемент уменьшается в объеме, вследствие чего между породой и цементом могут образоваться трещины, по которым будет проникать вода. В связи с этими особенностями магнезиального цемента нагнетать его нужно быстро, небольшими порциями и несколько раз.

3. При проектировании цементации необходимо учитывать температуру пород на глубине цементации, так как сроки затвердения цементов зависят от температуры. При низких температурах продолжительность затвердения некоторых видов цемента значительно удлиняется. При использовании таких цементов в условиях низких температур воду для приготовления раствора надо предварительно подогревать до 30—50°С, а скважины перед цементацией промывать подогретой водой с целью предварительного обогрева пород. Магнезиальный цемент может применяться без предварительного подогрева пород при температурах до минус 10 — минус 14°С.

4. Предельной скоростью движения подземных вод, при которой возможно применение обычных цементов, считается 20 м/сут. При больших скоростях следует применять быстросхватывающийся цемент, а если скорость превышает 80 м/сут, цементация становится нецелесообразной вследствие возможного выноса раствора из трещин потоком подземных вод. Для ускорения схватывания цемента применяют специальные ускорители, добавляемые в раствор: хлористый кальций, сода, жидкое стекло, хлористый барий и др.

Цементация применяется при проходке шахт, туннелей, строительства тяжелых плотин и других сооружений в трещиноватых водоносных породах.

В СССР цементация нашла широкое применение при проходке шахт в Донбассе, Кизеле и других районах, при строительстве Днепровской, Волховской и других гидроэлектростанций.

Глинизация. В тех случаях когда наличие больших трещин и каверн в породе, а также наличие глинистого и иного заполнителя в трещинах делают цементацию ненадежной и слишком дорогой, для заполнения трещин и уменьшения водопроницаемости пород (уплотнения пород) применяют глинизацию. Сущность этого способа заключается в том, что в трещины породы через специальные буровые скважины нагнетается не цементный, а глинистый раствор. В результате заполнения трещин глинистым раствором и последующего оседания глинистых частиц достигается полная водонепроницаемость породы. Чтобы ускорить оседание глинистых частиц в трещинах и удалить излишнюю воду из жидкого глинистого раствора, к нему прибавляют в качестве коагуляторов хлористый кальций и известь, а для отжима воды увеличивают давление нагнетания. При хорошем качестве глинизации (плотном заполнении пустот в породе глиной) глинизация является долговечной и не подвержена разрушению агрессивными подземными водами.

Техника выполнения работ по глинизации почти ничем не отличается от способа цементации. Основное преимущество способа глинизации перед цементацией заключается в его меньшей стоимости и возможности использования местных материалов. Глинизация не требует предварительной промывки трещин и очистки их от глинистого заполнителя.

Наилучшие результаты глинизация дает в безводных трещиноватых и закарстованных известняках с удельным водопоглощением от 0,1 до 100 л/мин.

Глинистый раствор, применяющийся для заполнения пустот, должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Вязкость раствора должна быть достаточно велика, но не настолько, чтобы затруднять нагнетание раствора.

2. Удельный вес раствора должен быть возможно большим.

3. Раствор должен обладать коллоидными свойствами для создания прочного геля.

4. В растворе должно быть минимальное количество песка.

Способ глинизации рекомендуется применять там, где требуется уменьшение водопроницаемости скальных трещиноватых пород при проходке шахт, устройстве водохранилищ, заполнении пустот за обделкой туннелей. Этот способ был успешно применен при проходке шахт в обводненных закарстованных известняках в Кизеле.

Горячая битумизация. При больших кавернах и больших скоростях движения подземных вод нагнетаемый цемент или глинистый раствор вымывается и цементация (глинизация) результатов не дает. В этом случае надежным способом уплотнения трещиноватых скальных пород является горячая битумизация.

Через специально пробуренные скважины нагнетают расплавленный битум, нагретый до 200—220°С. Битум обладает слабой теплопроводностью. При поддержании непрерывного тока горячей массы битум может распространяться по трещинам на значительные расстояния. Затвердевая в трещинах, битум придает породе монолитность.

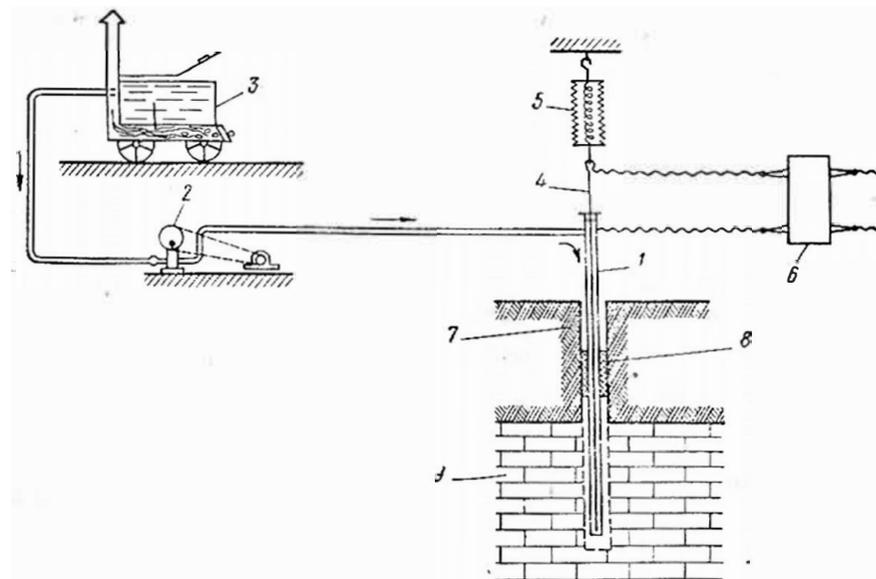


Рис. 80. Схема установки для производства горячей битумизации пород: 1 — инъектор; 2 — насос; 3 — котел; 4 — стержень для подогрева битума; 5 — пружина; 6 — трансформатор; 7 — скважина; 8 — цементная пробка; 9 — известняки трещиноватые

Способ битумизации применяется для решения ряда задач: а) уменьшения потерь воды на фильтрацию в основании плотины и в обход ее плечей; б) сжижения противодавления напорных вод на подошву плотины; в) уменьшения агрессивного воздействия подземных вод на выщелачиваемые и растворимые породы в основании плотины; г) ограждения котлованов, а также траншей, шахт и других горных выработок от притока подземных вод.

При битумизации трещиноватых пород скважины разбуриваются на расстоянии 0,75—3 м друг от друга.

Необходимое для битумизации оборудование (рис. 80) состоит из инъекторов 1, опускаемых в буровые скважины, насосной установки для нагнетания битума 2, котла 3 для варки битума, стержня 4 и другого электрооборудования для нагрева битума в скважине.

Инъектор, изготавливаемый из толстостенных цельнотянутых труб, перфорируется в пределах зоны битумизации. Стержень для нагрева битума натягивается пружиной для предотвращения возможности короткого замыкания.

Давление нагнетаемого битума должно быть значительно выше гидростатического давления грунтовых вод. Верхний предел давления не должен превышать давления от вышележащих пород.

Способ горячей битумизации имеет ряд преимуществ: а) битум устойчив против действия агрессивных подземных вод; б) битумизация применяется при больших скоростях подземных вод, когда другие способы неприменимы; в) возможность повторной битумизации.

ции при установлении неполноты ее путем прогрева существующих скважин и дополнительной инъекции битума; другие способы требуют в этом случае бурения новых буровых скважин; г) простота установки для проведения битумизации.

Способ битумизации имеет и свои недостатки: а) горячая битумизация может быть применена в породах с трещинами шириной более 1 мм; в трещины менее 1 мм горячий битум вследствие большой вязкости не проникает; б) невозможность горячей битумизации пород с удельным водопоглощением менее 1,0 и более 100 л/мин; в) горячий битум после остывания уменьшается в объеме до 12%, поэтому почти всегда возникает необходимость повторения битумизации; г) охлажденный битум под большими напорами способен к пластическому течению и может при благоприятных условиях выдавливаться из трещин.

Горячая битумизация наибольшее распространение получила при промышленном и гидротехническом строительстве. В США она широко используется при строительстве плотин. В СССР впервые битумизация была применена при заложении фундаментов намечавшегося строительства Дворцов Советов в Москве. Здесь для уплотнения каменноугольных, сильнотрещиноватых и обводненных известняков был применен способ битумизации.

Способ мелiorации пород без жестких связей

Изменение свойств глинистых и песчаных пород требуется чаще всего в тех случаях, когда они находятся в неустойчивом состоянии, не обеспечивают возможности строительства на них инженерных сооружений с заданной нагрузкой или не позволяют организовать горнопроходческие работы.

Изменение свойств несцементированных обломочных песчаных отложений направлено на создание монолитности и водонепроницаемости пород. Особенно большое практическое значение имеет закрепление водонасыщенных песчаных пород, обладающих плывунными свойствами.

Изменение свойств глинистых пород требуется чаще всего в двух случаях: 1) когда они находятся в неустойчивом текучепластичном состоянии на оползневых склонах или в откосах выемок, котлованов и других выработок и 2) когда им необходимо придать большую водонепроницаемость в оросительных каналах, в дне и стенках строительных котлованов.

К числу основных способов укрепления пород без жестких связей (песчаных и глинистых) относятся: а) замораживание, б) силикатизация песков, в) холодная битумизация песков, г) виброуплотнение песков, д) электродренаж глинистых пород, е) физико-химическое закрепление глинистых пород, ж) специальные методы закрепления просадочных лёссовых пород и з) закрепление почвогрунтов для дорожных целей.

Замораживание. Это способ временного изменения свойств горных пород, главным образом на период строительства. Сущность

его заключается в том, что вокруг проектируемой выработки (шахты, котлована, траншеи и т. п.) создают путем замораживания окружающих пород водонепроницаемую завесу. Эта завеса одновременно является прочной опорной стенкой, выдерживающей давление пород, залегающих за пределами замороженного участка. Прочность такой стенки зависит от ее толщины и температуры замороженной породы. Стенки должны быть заглублены в водонепроницаемый пласт с таким расчетом, чтобы они работали как шпунтовое ограждение, т. е. препятствовали проникновению подземных вод как со стороны стенок, так и дна будущей выработки.

При отсутствии водоупорных пород или большой их глубине залегания дно будущей выработки также замораживается.

Замораживание осуществляется следующим образом. По контуру проектируемой выработки, которая подлежит ограждению от доступа грунтовых вод, бурят скважины диаметром 6—10". Расстояние между скважинами обычно 1—2 м. Глубина скважин должна быть несколько более, чем требуемая глубина замораживания. В скважины опускают замораживающие колонки (трубы), по которым циркулирует нагнетаемая под давлением охлаждающая жидкость — раствор соли. Раствор этот охлаждает через стенки колонки породу вокруг скважины.

Для создания холода применяются компрессорные холодильные машины, работающие на таких летучих жидкостях — хладагентах (аммиак или углекислота), которые переходят в парообразное состояние при невысоких температурах и превращаются обратно в жидкость под действием сжатия и небольшого охлаждения.

Переход из жидкого состояния в пар сопровождается выделением большого количества тепла, необходимого для парообразования. Развиваемые при этом низкие температуры используются для охлаждения рассола — жидкости, нагнетаемой непосредственно в скважины.

В качестве жидкости — раствора, передающего принятый от хладагента холод, применяют обычно водный раствор хлористого кальция или хлористого магния. Растворы обладают способностью понижать температуру замерзающей воды, при этом понижение температуры замерзания пропорционально концентрации соли. Рассол хлористого кальция замерзает при минус 30 — минус 35° С. При замораживании температура рассолов обычно составляет минус 20 — минус 25° С и ниже.

Холодильная установка (рис. 81 и 82) состоит из компрессора с двигателем, конденсатора, регулирующего устройства, испарителя (рефрижератора), системы рассолопроводов, нагнетательного насоса и других вспомогательных механизмов и приборов.

Компрессор, представляющий собой всасывающий и нагнетательный насос, всасывает пары хладагента и сжимает их до давления, при котором температура сжатых паров будет приблизительно на 5—10° С выше температуры охлаждающей компрессор воды. В этом состоянии пары хладагента, пройдя через соединительный трубопровод, нагнетаются в конденсатор, в котором они охлажда-

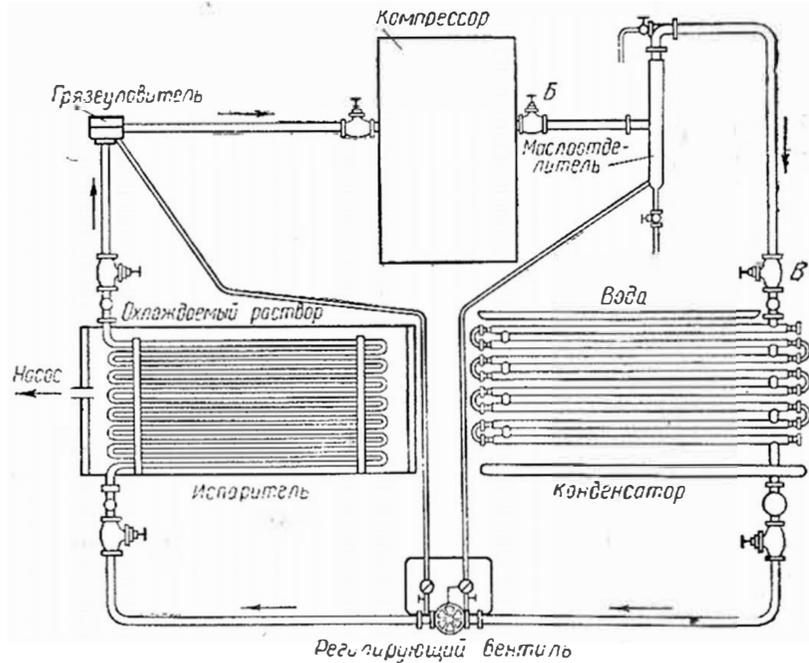


Рис. 81. Схема холодильника для замораживания пород

ются и конденсируются. Жидкий хладагент через регулирующий вентиль, посредством которого в испарителе поддерживается пониженное давление, поступает в испаритель. Испаряющийся здесь хладагент отнимает тепло от окружающей среды — раствора хлористого кальция и охлаждает его. Испарившийся хладагент снова засасывается компрессором, сжимается в нем, конденсируется в конденсаторе, и весь цикл повторяется вновь. Таким образом, компрессорная установка образует замкнутую систему, в которой непрерывно происходит процесс охлаждения.

Охлажденная жидкость — раствор соли — из испарителя нагнетательным насосом по прямому рассолопроводу подается через распределительный коллектор в замораживающую колонку, где она отдает холод окружающим ее породам и отепленной возвращается в собирательный коллектор, из которого по обратному рассолопроводу поступает в испаритель, где охлаждается и вновь совершает описанный круговорот. По истечении некоторого времени около каждой замораживающей колонки образуется цилиндр замороженной породы. Цилиндры всех скважин по истечении определенного времени (считается, что за сутки цилиндр каждой колонки нарастает на 2,5 см) сливаются друг с другом, образуется общая замороженная стенка, которая может нарастать при непрерывной подаче рассола в скважины. После окончания проходки шахты, туннеля или другой выработки, устройства необходимой гидроизоляции и обделки ее замораживание прекращается, замороженная порода

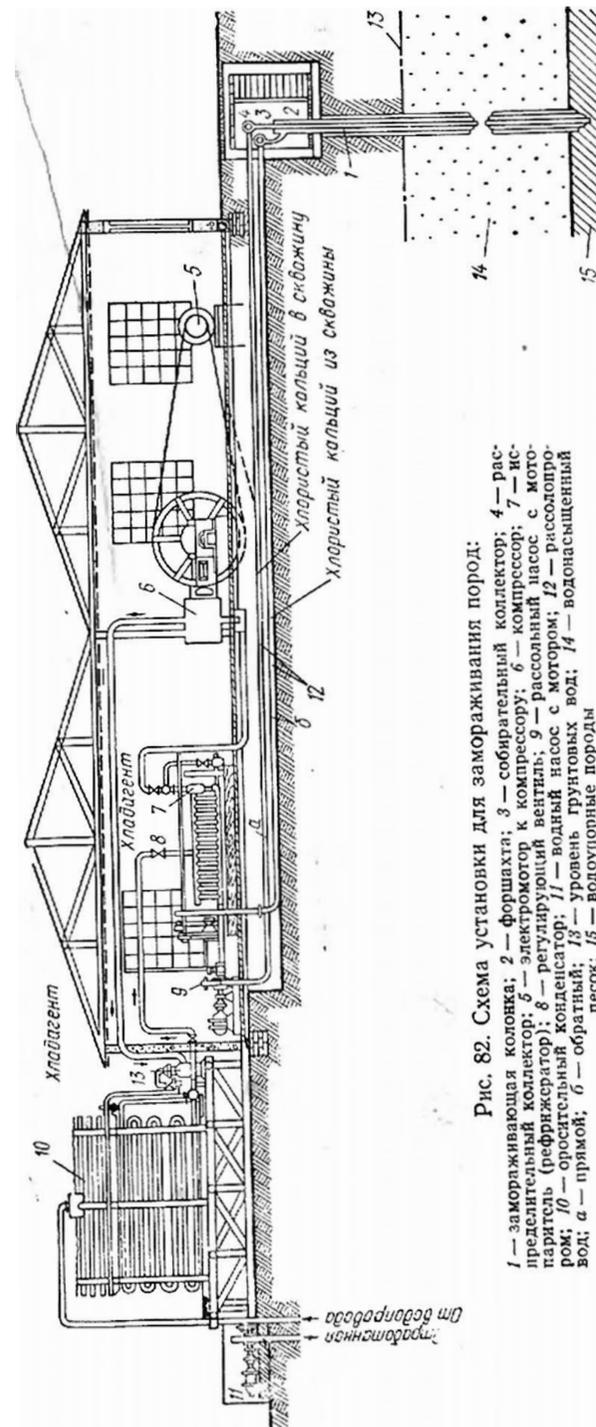


Рис. 82. Схема установки для замораживания пород:
 1 — замораживающая колонка; 2 — форшахта; 3 — собирательный коллектор; 4 — распределительный коллектор; 5 — электромотор к компрессору; 6 — компрессор; 7 — испаритель (рефрижератор); 8 — регулирующий вентиль; 9 — рассольный насос с мотором; 10 — оросительный конденсатор; 11 — водный насос с мотором; 12 — рассолопровод; а — прямой; б — обратный; 13 — уровень грунтовых вод; 14 — водонасыщенный песок; 15 — водоупорные породы

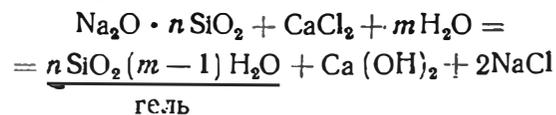
постепенно размораживается естественным путем. В отдельных случаях (при глубоких шахтах), когда имеются опасения неравномерного оттаивания и создания повышенных неравномерных давлений породы на крепление выработки, устраивается искусственное оттаивание путем закачки в замораживающие колонки подогретого рассола.

При организации работ по замораживанию пород одной из важнейших задач является изучение инженерно-геологических условий участка будущих работ. Инженерно-геологическая характеристика участка должна содержать сведения о литологическом составе пород, об условиях их залегания и мощности, о влажности, удельном и объемном весе пород, удельной теплоемкости всех пород, подлежащих замораживанию, общей засоленности пород и характере солей, глубине залегания грунтовых вод, скорости их движения, общей минерализации и химическом составе. Эти данные необходимы для проектирования замораживания, определения количества и глубины скважин, расчета холодильной установки, ее мощности.

Замораживание довольно часто применяется при строительстве подземных сооружений, а также в шахтном и гидротехническом строительстве и иногда при возведении промышленных сооружений и опор мостов. Особенно успешно этот способ применялся и применяется при строительстве Московского метрополитена. С помощью замораживания построены весьма сложные подземные сооружения в особо неблагоприятных инженерно-геологических условиях, например наклонные эскалаторные ходы в неустойчивых плавунных породах.

Способ замораживания имеет и определенные недостатки: 1) длительность процесса (от начала замораживания до начала проходки выработки проходит 1—2 месяца); 2) сложность и громоздкость применяемого оборудования и довольно длительные сроки его монтажа; 3) возможность пучения пород и др.

Силикатизация. Химическое закрепление песков, или силикатизация, заключается в том, что в подлежащую закреплению песчаную породу последовательно нагнетают жидкое стекло (натровый силикат) и раствор хлористого кальция. Жидкое стекло вытесняет воду из пор породы и заполняет почти все свободные поры между частицами породы. В результате нагнетания первого раствора вокруг скважины образуется массив породы, насыщенный жидким стеклом. После этого через ту же скважину нагнетают второй раствор — хлористый кальций, который выжимает из породы часть первого раствора. При этом вокруг каждой песчаной частицы остаются пленки жидкого стекла, с которыми хлористый кальций вступает в химическую реакцию. Эта реакция приводит к выпадению нерастворимого в воде геля кремнекислоты, который постепенно твердеет и цементирует песок:



Остающиеся в породе поры, будучи замкнутыми, не могут служить путями циркуляции воды.

Закрепленный химическим способом песчаный грунт приобретает важные в строительном отношении свойства: значительную механическую прочность, водонепроницаемость и устойчивость против воздействия агрессивных подземных вод и кислот. Прочность химически закрепленной песчаной породы зависит от целого ряда факторов. Наибольшее влияние на прочность закрепленного песка оказывает крупность частиц песка и качество применяемых химических растворов. Прочность закрепленных песков колеблется от 15 до 60 кг/см^2 . Радиус закрепления вокруг одной скважины изменяется от 0,25 до 0,8 м. Наибольшая прочность достигается при закреплении мелкозернистых песков, наименьшая — крупнозернистых песков. Прочность всякой закрепленной породы увеличивается с течением времени. Приблизительно около половины конечной прочности закрепленный песок приобретает в первые два часа после закрепления; затем наиболее интенсивное нарастание прочности происходит в первые 10 суток, после чего нарастание прочности происходит очень медленно и, как показывает опыт, может продолжаться до двух лет.

Влияние минералогического состава песков на эффект закрепления почти не изучено. Накопленный опыт показывает, что наиболее эффективно закрепляются однородные кварцевые пески.

Для получения высокого качества закрепления применяемые растворы должны удовлетворять следующим техническим условиям: модуль силиката раствора $\frac{\text{SiO}_2}{\text{NaO}}$ должен быть не ниже 2,6; удель-

ный вес раствора 1,48—1,49; количество нерастворимых в воде примесей не должно превышать 1%; раствор должен быть чистым, прозрачным. Раствор хлористого кальция не должен содержать примесей больше 30 г/л и взвешенных частиц более 0,2 г; CaCl_2 в растворе должно быть не менее 350 г, что соответствует удельному весу 1,26; рН раствора не должно быть меньше 5,5—6.

Двухрастворный способ силикатизации, как уже было сказано выше, используется для закрепления мелкозернистых и крупнозернистых песков, характеризующихся коэффициентом фильтрации от 2 до 80 м/сут . При коэффициенте фильтрации больше 80 м/сут силикатизация не применяется, так как при такой скорости фильтрации растворы выносятся из породы. Если коэффициент фильтрации около 0,1—2 м/сут (тонкозернистые пески, супеси, лёссовидные суглинки), применяется однорастворный способ силикатизации. Наибольшее применение он получил при закреплении лёссовидных пород.

Силикатизация нашла особенно широкое применение при реконструкции Лондонского метрополитена. Весьма успешно этот способ был применен при строительстве Московского метрополитена. В качестве примера можно указать также закрепление песчаных пород в основании фундаментов здания быв. Коминтерна на Моховой улице. В связи со строительством метро порода под основанием зда-

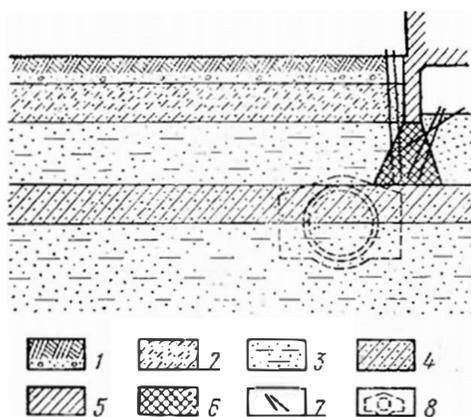


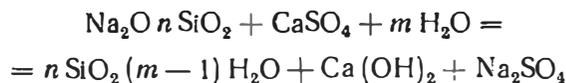
Рис. 83. Закрепление водонасыщенных песков в основании фундамента здания: 1 — культурный насыпной слой; 2 — супесь; 3 — водонасыщенный песок; 4 — моренный суглинок; 5 — фундамент здания; 6 — закрепленный силикатизацией песок; 7 — буровые скважины для силикатизации; 8 — туннель метрополитена

ния оказалась сильно разрыхленной и здание начало давать осадку. Для прекращения осадки было решено закрепить породы основания фундаментов силикатизацией. Основание фундаментов покоилось на песках разнозернистых мощностью около 7 м. Ниже залегали моренные суглинки, еще ниже — флювиогляциальные водоносные пески. Закреплению было решено подвергнуть пески, залегающие между подошвой фундамента и кровлей моренного суглинка, мощностью 4—5 м (рис. 83). Контур закрепления в сечении имел вид трапеции, верхняя сторона которой равнялась 1,25 м, а основание — 3,80 м. Общее количество инъекторов 110 шт. Они были расположены вдоль фасада здания, имевшего в длину 22 м. Инъекторы располагались с двух сторон: с наружной стороны и из подвала (см. рис. 83). Нагнетание жидкого стекла производилось при забивке инъекторов, а хлористого кальция — при постепенном извлечении их.

По окончании работ на границах закрепленной призмы пород были пройдены контрольные шурфы, которые показали однородность закрепления породы в пределах намеченной проектом призмы. Прочность закрепленной породы составила 15 кг/см².

Для закрепления просадочных лёссов и лёссовидных суглинков применяют однорастворный способ — закрепление жидким стеклом.

Так как лёссы и лёссовидные породы обычно содержат значительное количество сернистого кальция, хлористый кальций (второй раствор) не употребляется, а необходимая для химической реакции серная кислота извлекается из закрепляемых пород, которые, как известно, всегда содержат более или менее значительное количество гипса. Химическая реакция протекает по следующей схеме:



В результате этой реакции на частицах грунта и стенках капилляров образуется пленка геля кремниевой кислоты, которая в процессе

нагнетания жидкого стекла постепенно нарастает, а пористость породы уменьшается, в результате чего резко уменьшается и ее водопроницаемость. Обычно максимальное нарастание пленки геля происходит в течение 1—3 суток. За это время весь закаченный раствор переходит в гелеобразное состояние. Закрепляемые породы теряют просадочные свойства и приобретают прочность, равную примерно 6—8 кг/см².

Радиус закрепления при однорастворном способе силикатизации зависит от коэффициента фильтрации закрепляемой породы и применяемого для нагнетания раствора давления. Обычно этот радиус изменяется от 0,2 до 1,0 м.

Холодная битумизация песков. Холодная битумизация применяется в тех случаях, когда при строительстве возникает необходимость уменьшить водопроницаемость песков без увеличения их прочности. С этой целью в породы закачивается не жидкий битум, как описано выше, а специальная битумная эмульсия. Вводимая в породу через специальные скважины битумная эмульсия распадается под влиянием коагуляторов, вода выделяется, а расплывшиеся частицы битума свертываются, заполняя пустоты в породе и уменьшая тем самым ее водопроницаемость. Успешность применения холодной битумизации зависит от степени измельчения частичек битума в водной среде. По имеющимся данным, битумная эмульсия достаточно легко проникает в песок, если частицы битумной эмульсии в 25—35 раз меньше среднего размера зерен песка. Для холодной битумизации крупнозернистых песков применяют обычно эмульсии с размерами частиц битума 1—30 мк, а для битумизации мелко- и среднезернистых песков — 1—3 мк.

Нижним пределом успешного применения способа холодной битумизации являются песчаные породы, коэффициент фильтрации которых не менее 10 м/сут, а верхним — породы, коэффициент фильтрации которых не превышает 100 м/сут.

Радиус закрепления изменяется в зависимости от гранулометрического состава песков: для мелкозернистых песков 0,5—0,75 м, среднезернистых — 0,75—1,0 и крупнозернистых — 1,25—2,0 м.

Виброуплотнение песков. Способ виброуплотнения основан на способности песков рыхлого сложения уплотняться под действием динамической нагрузки или вибрации.

Способность песков к уплотнению под влиянием вибрации определяется коэффициентом вибровязкости:

$$\beta_{\text{виб}} = \frac{a}{mK},$$

где a и K — эмпирические коэффициенты, устанавливаемые для каждого песка индивидуально; m — относительная величина ускорения вибрации, равная отношению ускорения вибрации $g_{\text{виб}}$ к ускорению силы тяжести g :

$$g_{\text{виб}} = A\omega^2,$$

где A — амплитуда колебаний, ω — частота колебаний.

Наименьшим значением коэффициента вибровязкости обладают слабовлажные и сильновлажные пески. При некоторой средней

влажности, около 13—14%, коэффициент вибровязкости имеет максимальное значение. Пески, находящиеся в состоянии полного водонасыщения и под напором, уплотняться не могут. Пески, влажность которых меньше средней оптимальной влажности, при виброуплотнении должны дополнительно увлажняться.

В настоящее время применяются два способа виброуплотнения — поверхностный и глубинный. Первый способ предназначен для уплотнения поверхностного слоя песков (0,20—0,30 см). Для этой цели применяют легкие типы вибраторов, имеющие специальную иглу для дополнительного увлажнения песков в процессе уплотнения.

«Глубинное» уплотнение производится с помощью тяжелых поверхностных вибраторов, уплотняющих пески до глубины 3 и даже 5—7 м. Глубинное виброуплотнение применяется для уплотнения насыпных рыхлых песков под фундаментами зданий, а также для уплотнения насыпей, дамб, плотин и других земляных сооружений.

Кроме уплотнения вибрация вызывает перераспределение материала внутри уплотняемой породы. Так, при наличии в песке примеси глинистых частиц или строительного мусора (шлака, битого кирпича, стружки, щепы и т. д.) последние под влиянием вибрации перемещаются вверх и их можно удалить, заменяя дополнительной подсыпкой чистого песка.

Электродренаж глинистых пород. При пропуске постоянного тока через глинистые породы и пылеватые глинистые пески-пльвуны, как известно, в породах происходит движение воды от анода к катоду, а мелкие коллоидные частицы движутся к аноду. Передвижение воды под действием постоянного электрического тока используют для обезвоживания грунтов со слабой водоотдачей. Такое обезвоживание пород носит название *электродренажа*.

Практически электродренаж осуществляется следующим образом. Вокруг контура отрываемого котлована бурятся на небольших расстояниях буровые скважины на глубину, несколько превышающую глубину проектируемого котлована. В случае большой глубины бурение скважин осуществляется ярусами. По мере осушения верхней части пород бурится новый ряд скважин для осушения нижней части разреза. Бурение скважин часто заменяется забивкой иглофильтров.

Буровые скважины оборудуются обсадными трубами и фильтрами. Головы обсадных колонн всех скважин или иглофильтров соединяются между собой коллектором — кольцевой трубой, соединенной с насосом. Коллектор также соединяется проводом с отрицательным полюсом генератора постоянного тока. Буровые скважины или иглофильтры являются отрицательными электродами — катодами. На расстоянии 0,5—0,8 м ближе к контуру котлована параллельно линии катодов в породу забивают газовые трубы напротив каждого катода. Трубы забивают на глубину, равную глубине буровых скважин. Верхние концы труб соединяются между собой проводом, который подключается к положительному полюсу источника

постоянного тока (рис. 84). При пуске генератора постоянный ток вызывает движение воды из зоны анодов к катодам. Собирающаяся у катодов вода через коллектор откачивается насосом. Поступление воды к контуру котлована уменьшается, а затем вообще прекращается, что позволяет вести отрывку котлована всухую. Способ этот применяется также для быстрого осушения сооруженных путем намыва плотин, дамб, насыпей и других из слабо фильтрующихся грунтов.

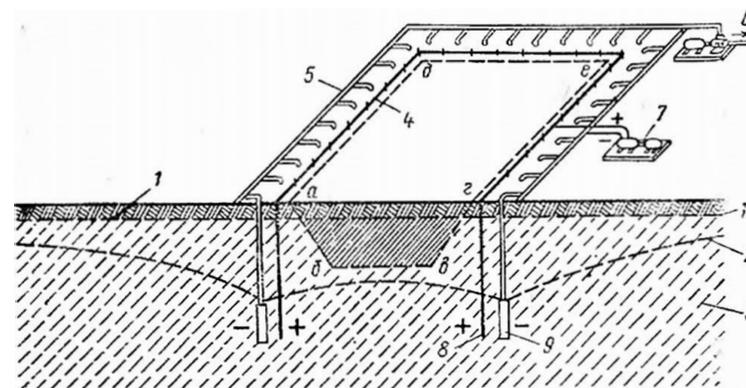


Рис. 84. Схема электродренажа:

1 — уровень грунтовых вод до осушения; 2 — уровень грунтовых вод, сниженный электродренажем; 3 — водоносные породы; 4 — электрическая цепь, соединяющая аноды; 5 — коллектор, соединяющий буровые скважины (катоды); 6 — насос; 7 — генератор постоянного тока; а, б, в, г, д — контур отрываемого котлована

Расход электроэнергии составляет от 2 до 10 кВт·ч на 1 м³ осушаемой породы в пределах контура, огражденного катодами — иглофильтрами или буровыми скважинами.

Процесс электродренажа, как было уже сказано в гл. 10, сопровождается явлением переноса с водой обменных катионов диффузивных оболочек, что одновременно с обезвоживанием ведет к накоплению простых солей, чаще всего солей кальция, цементации породы в зоне катода и повышению ее прочности. Это закрепление постепенно распространяется от катода к аноду. Употребление железных и алюминиевых труб ведет к усилению этого процесса, так как отделяющиеся от труб трехвалентные катионы Fe³⁺ или Al³⁺, обладая большой энергией обмена, замещают в диффузивных оболочках глинистых частиц катионы кальция и натрия. Такая замена уменьшает гидрофильность глинистых пород, снижает их способность к набуханию, уменьшает пластичность.

Физико-химические способы изменения свойств глинистых пород. При проведении оросительных каналов, устройстве прудов и малых водохранилищ в условиях распространения водопроницаемых суглинков часто возникает необходимость уменьшения водо-

проницаемости суглинков для снижения потерь воды на фильтрацию в борта и дно каналов и водохранилищ, предотвращения в связи с этим подъема уровня грунтовых вод и возникновения опасности засоления земель вдоль каналов. Бетонирование дна и стенок каналов и прудов требует весьма значительных затрат материалов и денежных средств.

А. Н. Соколовский предложил уменьшать водопроницаемость пород путем увеличения толщины гидратных оболочек диффузного слоя. Это достигается заменой двухвалентных катионов (главным образом кальция) одновалентными катионами натрия. Последние, перейдя в поглощенное состояние, образуют более толстый диффузный слой. Это увеличивает способность глинистой породы к набуханию и уменьшает ее водопроницаемость. Кроме того, насыщение катионом натрия повышает степень дисперсности породы вследствие распада агрегатов на элементарные частицы. Этот процесс также способствует уменьшению водопроницаемости.

Практически замена поглощенного кальция натрием осуществляется путем поливки откосов и дна канала или водоема раствором хлористого натрия в количестве, эквивалентном содержащемуся в породе поглощенному кальцию.

Потеря воды на фильтрацию при этом способе снижается с 13 до 1—1,5% на 1 км длины канала. Этот эффект сохраняется в течение нескольких лет. После этого производится новая обработка канала раствором NaCl. Для предупреждения растрескивания после обработки откосы каналов прикрывают слоем песка толщиной в несколько сантиметров.

Способ А. Н. Соколовского был успешно применен при строительстве оросительных каналов в Заволжье, прудов на Украине и в других местах.

Имеются и другие способы создания водонепроницаемых пленок на стенках и дне водоемов: путем осаждения геля гидрата окиси железа (В. А. Приклонский и Ф. Ф. Лаптев) и покрытия откосов и дна водоемов различными гидрофобными материалами (П. А. Ребиндер).

Уплотнение слабых пород песчаными сваями. Песчаными сваями можно уплотнять рыхлые песчаные, пылеватые породы, илы, ленточные глины, а также слабые насыпные грунты. Для этого на площади намеченного уплотнения буровые скважины закладывают увлажненным песком и уплотняют последний. Чтобы создать максимальное уплотнение, заполнение стволов скважин производится постепенно. Песчаная свая уплотняет окружающую породу и воспринимает вместе с ней нагрузку от сооружения. Таким образом, получается уплотненное основание, модуль деформации которого значительно превышает модуль деформации породы в естественных условиях залегания (до уплотнения).

Площадь уплотненного основания и число свай определяют путем расчета по соответствующим формулам.

Глубину уплотнения принимают равной сжимаемой толще пород основания, но не менее чем на глубину, равную двум ширинам

фундамента для прямоугольных фундаментов и трех-четырёх — для ленточных.

Песчаные сваи являются одним из простых и весьма экономичных способов улучшения инженерно-геологических свойств пород в основании фундаментов сооружений. Стоимость подготовки основания путем устройства песчаных свай почти в два раза меньше стоимости устройства оснований из железобетонных свай.

Методы искусственного укрепления пород при дорожном и аэродромном строительстве. Основным недостатком горных пород без жестких связей как материала проезжей части дорог аэродромных полей и других наземных сооружений является резкое уменьшение устойчивости при увеличении влажности глинистых пород и уменьшении влажности песчаных пород. В том и другом случае полотно дороги, сложенное такими породами, становится труднопроходимым, а порой и непроходимым для колесного транспорта. Для устранения этого недостатка производится укрепление пород дорожного полотна.

Способы укрепления пород для поверхностного — аэродромного, дорожного и др. — строительства имеют специфические особенности. Прежде всего эти способы применяются для укрепления самого верхнего покрова земной коры — почв и первых от поверхности пород, представленных главным образом различными генетическими типами пород четвертичного возраста — песками, супесями, суглинками, глинами. Укреплению могут подлежать значительные участки местности по трассе дороги. Учитывая массовость, способы укрепления должны быть относительно простыми в техническом отношении и дешевыми.

В настоящее время разработано довольно большое количество способов искусственного укрепления грунтов, используемых в качестве основания дорог и их покрытий. Их часто объединяют под общим названием *стабилизации грунтов* при дорожном строительстве. При этом под этим термином понимают комплекс мероприятий, обеспечивающих устойчивое состояние почвогрунтов дорожного полотна и его основания в сухом и влажном состоянии.

После проведения мероприятий по укреплению грунтов они должны выдерживать все напряжения, возникающие при проходе транспорта, без каких-либо значительных деформаций. После стабилизации грунты дорожного полотна должны обладать большой связностью в сухом и влажном состоянии, незначительной набухаемостью и липкостью. Они не должны сильно пылить и давать колеи (табл. 53).

Коротко охарактеризуем приведенные в таблице методы.

1. *Гранулометрические добавки* применяют в тех случаях, когда содержание в естественном грунте песчаных, глинистых и пылеватых частиц не отвечает оптимальному. Под грунтами оптимального гранулометрического состава понимают грунты с определенным соотношением содержания основных групп фракций — песчаных, пылеватых и глинистых. Состав оптимальных грунтов зависит от климатических условий района (главным образом от влажности). Для

Способы укрепления почвогрунтов, применяемые в дорожном строительстве
(по В. М. Безруку)

№ п/п	Способы укрепления	Материалы, применяемые для обработки	Почвогрунты, рекомендуемые для обработки
1	Гранулометрические добавки	Щебень, гравий, дресва, шлаки, песок	Глинистые, суглинистые, пылеватые
2	Органические вяжущие материалы	Глина, суглинок Битумы твердые и жидкие, мазут, нефть, дегти Эмульсии битумные и дегтевые	Песчаные, суглинистые, пылеватые Суглинистые, глинистые
3	Неорганические вяжущие материалы	Портландцемент, шлакопортландцемент, гипсошлаковые и известково-шлаковые цементы Известь гашеная — пушонка, известь негашеная — молотая килпелка	Песчаные, супесчаные, пылеватые, суглинистые, глинистые
4	Солевые растворы	Хлористый кальций, хлористый магний, хлористый натрий	Супесчаные и пылеватые
5	Термическая обработка	Дрова, хворост и другое местное топливо	Глинистые, суглинистые
6	Комплексное укрепление	Гранулометрические добавки + органические вяжущие Гранулометрические добавки + неорганические вяжущие Гранулометрические добавки + гигроскопические соли Органические вяжущие + неорганические вяжущие Обжиг или прогрев + органические вяжущие	Глинистые, суглинистые, пылеватые

различных климатических зон он изменяется в следующих пределах:

Фракция	Диаметр частиц, мм	Содержание, %
Песка	2 — 0,25	20—60
Песка	0,25 — 0,05	10—55
Пылеватая	0,05 — 0,005	15—35
Глинистая	< 0,005	13—14

Если естественные грунты не отвечают оптимальному составу, в них вносят соответствующие добавки, в результате которых грунт приобретает необходимые свойства. При этом следует иметь в виду, что песчаные частицы служат скелетом, воспринимающим на себя основные механические воздействия в период сильного увлажнения дороги. Глинистые частицы, равномерно распределенные по всей массе грунта, служат связующим материалом и обеспечивают устойчивость всей смеси в сухое время года. Пылеватые частицы заполняют промежутки между крупными частицами, уменьшают пористость и способствуют увеличению внутреннего трения.

Искусственные оптимальные смеси должны быть хорошо перемешаны для равномерного распределения разных частиц во всей мас-

се и при укладке уплотнены при оптимальной влажности. Только при этих условиях достигается необходимая устойчивость полотна дороги, выпо. лненногаз искусственно приготовленной оптимальной гранулометрической смеси.

2. *Органические вяжущие материалы* получили широкое распространение при устройстве покрытий и оснований для дорог и аэродромов. При этом лучшие результаты дает обработка битумами и дегтями почвогрунтов подзолистой и черноземной зоны. Обработка органическими вяжущими материалами засоленных почвогрунтов результатов не дает, так как вяжущие материалы из них легко вымываются. Лучше всего обрабатываются грунты оптимального гранулометрического состава и супесчаные и пылеватые почвогрунты.

При воздействии органических вяжущих материалов на грунты, по исследованиям М. М. Филатова, происходит механическое заполнение пор грунта вяжущим материалом, связывание отдельных частиц и агрегатов между собой и адсорбция некоторых составных частей вяжущего материала поверхностью тонкодисперсных частиц грунта. В результате этих процессов коренным образом улучшаются дорожные свойства почвогрунтов: а) увеличивается прочность; б) увеличивается водостойкость; грунты, обработанные органическими вяжущими материалами, не размокают в воде, уменьшается резко их набухаемость; в) уменьшается деформируемость, значительно снижаются остаточные деформации от статических и динамических нагрузок.

3. *Неорганические вяжущие материалы* при воздействии на почвогрунты благоприятно влияют на их дорожные свойства. В качестве вяжущих материалов используются главным образом различные цементы и известь.

При обработке грунта цементом происходят сложные физико-химические процессы, в результате которых образуются прочные нерастворимые в воде соединения — гидросиликаты и гидроалюминаты, образующие связи между частицами грунта. Воздействие цемента зависит от химического состава обрабатываемого грунта. Наиболее прочно связываются цементом карбонатные грунты. Благоприятным фактором является также наличие в некоторых почвогрунтах (например, черноземах) обменного кальция, который способствует образованию прочных микроструктур. Большое содержание в грунте воднорастворимых солей (сернокислый натрий и др.) отрицательно сказывается на прочности грунта при внесении в него цемента. В кислых почвах процессы гидролиза и твердения цемента замедляются и прочность цементогрунта получается незначительной.

В результате обработки почвогрунтов цементами повышается их прочность, водостойкость. При этом прочность почвогрунтов, обработанных большими количествами цемента, может возрастать во времени. Почвогрунты приобретают свойства жесткого непластичного материала.

Особенно хорошие результаты по укреплению дорожных грунтов получают при комплексной обработке грунта цементом и битум-

ной эмульсией. При такой обработке сочетаются два процесса: при схватывании цемента необходима влага, а при распаде битумной эмульсии и выделении из нее битума одновременно выделяется вода, которую и поглощает цемент. В результате этих процессов закрепляемый грунт приобретает прочность и водонепроницаемость. Последний при обработке грунта только цементом не достигается.

Кроме цемента для укрепления грунта может использоваться известка как в гашеном, так и негашеном виде. Известка, как и цемент, делает почвогрунты водоустойчивыми и повышает механическую прочность их во влажном состоянии.

Для получения закрепляющего эффекта необходимо тщательное перемешивание и увлажнение смеси и последующее ее уплотнение.

Известкой можно укреплять кислые болотные, подзолистые, а также засоленные — солонцеватые почвогрунты и солонцы. Прочность почвогрунтов, закрепленных известкованием, ниже прочности почвогрунтов, закрепленных цементом.

4. *Солевые растворы* используются для укрепления дорожных почвогрунтов. Почвогрунты, обработанные гигроскопическими солями — хлористым кальцием, хлористым магнием, хлористым натрием, притягивают пары воды из воздуха, обладают слабой испаряющей способностью, поэтому при сухой погоде могут сохранять сообщенную им оптимальную влажность довольно продолжительное время. Гигроскопические соли обеспечивают также наиболее благоприятные условия для максимального уплотнения грунта в течение продолжительного времени после строительной укладки, т. е. дают возможность уплотнять грунты дорожного полотна в период эксплуатации движущимся транспортом. Максимально уплотненная поверхность грунтовой дороги медленнее изнашивается, не пылит в сухое время года и сохраняет устойчивость во влажный период, так как плотно обработанный слой почти не пропускает воду.

5. *Термическая обработка* применяется для глинистых и суглинистых почвогрунтов. При длительном воздействии на такие грунты высоких температур происходят глубокие изменения в их структуре, физическом состоянии и механических свойствах. Они теряют физически связанную воду, а при высоких температурах — и значительную часть химически связанной воды, утрачивают пластичность и липкость. Вследствие спекания частиц грунт становится неразмокаемым, не набухает и приобретает большую механическую прочность.

В зависимости от температуры и длительности ее воздействия на грунт различают следующие виды термической обработки: а) прогрев или термическая дегидратация; б) обжиг; в) клинкерный обжиг.

Прогрев, или термическая дегидратация, осуществляется при температуре 300—500°С. При этом глинистые минералы (монтмориллонит, каолинит, глиноды, галлуазит и др) обезвоживаются, теряя цеолитную воду; органические соединения разрушаются, в результате чего глинистые грунты резко снижают пластичность и липкость, приобретают водостойкость.

Обжиг грунтов происходит при более высокой температуре — 600—800°С. При этой температуре происходит дальнейшее обезвоживание минералов с частичной потерей кристаллизационной и конституционной воды, начинается разрушение и перестройка кристаллических решеток минералов. Глинистые грунты полностью утрачивают характерные для них признаки — пластичность, набухание, липкость, размокание. Происходит спекание грунта в монолитную камневидную массу, обладающую значительной механической прочностью — временное сопротивление сжатию достигает 100 кг/см² и более.

Клинкерный обжиг осуществляется при температуре 1100°С и выше. При этих температурах происходит разрушение минералов, спекание и частичное расплавление легкоплавких минералов. В результате такого обжига получается плотный, искусственно каменный материал — клинкер, механическая прочность которого более 600 кг/см².

Обжиг осуществляется на специальных клинкерных заводах, которые изготавливают клинкерный камень для устройства высокопрочных дорожных покрытий в районах отсутствия естественных каменных материалов.

6. *Комплексное укрепление почвогрунтов* осуществляется путем одновременного проведения двух из описанных выше способов укрепления. Оно применяется в тех случаях, когда применение одного какого-либо способа не дает необходимого эффекта укрепления дорожных почвогрунтов.

Укрепление просадочных лёссов и лёссовидных пород. Для укрепления просадочных лёссовидных пород в настоящее время разработан ряд способов, которые позволяют ослабить или совсем исключить деформации, связанные со специфическими особенностями этих пород давать значительные просадки при увлажнении. Среди этих способов следует указать: однорастворную силикатизацию, термическое укрепление, уплотнение набивными сваями, поверхностное уплотнение.

Термическое укрепление просадочных лёссов состоит в том, что толщу просадочных пород в пределах необходимой глубины и площади распространения подвергают воздействию раскаленными газами, под влиянием которых породы теряют свои просадочные свойства. Слабые макропористые лёссы и лёссовидные породы приобретают после обжига повышенную прочность (10—12 кг/см²), становятся неразмокаемыми, теряют способность к просадкам, не набухают. Однако обожженная лёссовидная порода обладает повышенной водопроницаемостью, и, если обжиг сделан не на всю глубину просадочной толщи, вода может проникнуть сквозь обожженную часть толщи и вызвать просадку пород ниже обожженной зоны. Поэтому обжигать следует на всю мощность просадочной толщи.

Создание высоких обжигающих температур достигается сжиганием топлива на устьях специально бурящихся скважин (рис. 85) и нагнетанием горячих газов в скважину. Одновременно в скважину

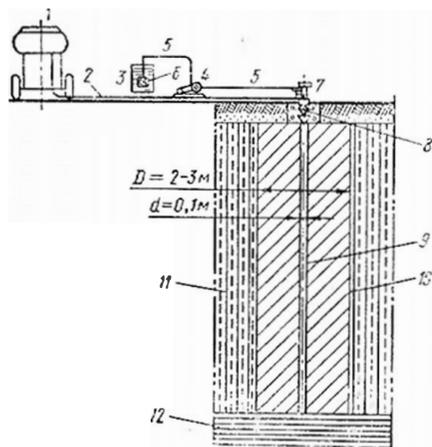


Рис. 85. Схема установки для термического укрепления просадочной лёссовой породы:

1 — компрессор; 2 — трубопровод для холодного воздуха; 3 — резервуар для жидкого горючего; 4 — насос для подачи горючего в скважину; 5 — трубопровод для горючего; 6 — фильтр; 7 — форсунка; 8 — затвор с камерой сгорания; 9 — скважина; 10 — зона термического закрепления; 11 — просадочная порода; 12 — непросадочная порода

жидкого топлива чаще всего применяют дизельное или соляровое масло.

Для получения вокруг 1 лог. м скважины обожженного массива диаметром от 2 до 3 м требуется от 100—120 до 180 кг жидкого топлива. Продолжительность обжига массива вокруг скважин глубиной 10—15 м продолжается 5—10 дней.

Уплотнение набивными сваями. Способ этот состоит в том, что по площади основания проектируемого сооружения бурится система скважин на глубину сжимаемой толщи, глубина в любом случае не должна быть меньше двойной ширины фундамента для прямоугольных фундаментов и тройной-четверной — для ленточных. Для просадочных лёссов и лёссовидных пород скважины проходят до подстилающих непросадочных пород. Буровые трубы извлекают и в скважинах взрывают заряды какого-либо взрывчатого вещества. Скважины забивают песком или лёссовой породой с постепенным уплотнением и увлажнением.

Количество и размещение свай устанавливается специальной инструкцией (СН 33—66).

Поверхностное уплотнение просадочных пород. Способ поверхностного уплотнения применяется для уплотнения слабых пород оснований промышленных и гражданских зданий. Особое развитие этот способ получил при уплотнении просадочных лёссовых пород, верхние слои которых под влиянием уплотнения уменьшают или утрачивают совершенно свои просадочные свойства. Способ этот состоит в том, что на проектной отметке разработки строительного

нагнетается под давлением холодный воздух, увеличивающий длину факела и равномерно распределяющий температуру по всему стволу скважин. Нагнетание воздуха сокращает продолжительность обжига и предотвращает нежелательное спекание и оплавление породы, резко сокращающие размер зоны обжига.

Для создания зоны обожженного грунта на какой-либо площади на ней располагают необходимое количество скважин из расчета допустимого расстояния между ними до 2—3 м. Максимальная глубина скважин 15 м.

В качестве горючего в зависимости от местных условий применяют газ, жидкое или твердое топливо. Из

котлована устанавливается кран с подвешенной тяжелой железобетонной трамбовкой, которая сбрасывается с высоты 3,5—4 м на поверхность породы и постепенно уплотняет ее до проектной отметки (рис. 86).

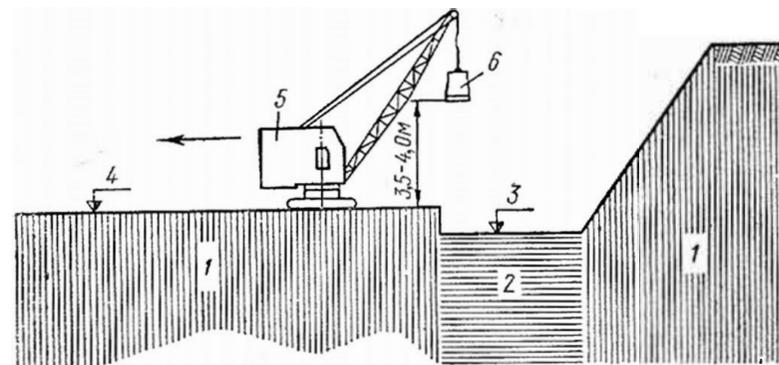


Рис. 86. Схема поверхностного уплотнения просадочной лёссовой породы:

1 — просадочная лёссовая порода неуплотненная; 2 — уплотненный участок; 3 — проектная отметка дна котлована; 4 — отметка разработки дна котлована; 5 — кран; 6 — железобетонная трамбовка

В 1955 г. трамбование было официально санкционировано Госстроем СССР в качестве одного из способов устранения просадочных свойств лёссовых пород. Основные положения этого способа изложены в СНиПе 1962 г., где приведена схема производства работ по уплотнению с указанием количества ударов трамбовки по одному месту и величины отказа при осадке породы после удара на момент окончания трамбовки (1—2 см). Размеры уплотняемой площадки определяются по специальной формуле. Минимальная глубина уплотнения принимается равной 1,5 м.

Контрольные вопросы

1. Перечислите методы искусственного улучшения инженерно-геологических свойств пород с жесткими связями.
2. То же, пород без жестких связей.
3. В каких случаях применяется замораживание? Каковы достоинства и недостатки этого способа?
4. В чем сущность способа силикатизации, каковы модификации этого способа и в каких случаях он применяется?
5. Когда применяются способы горячей и холодной битумизации?
6. В чем суть способа глинизации пород и для каких целей он применяется?
7. В чем суть способа цементации и для каких целей он применяется?
8. Электродренаж, как он осуществляется и для каких целей?
9. Основные способы устранения просадочных свойств лёссовых пород.
10. Основные способы стабилизации дорожных почвогрунтов.

Литература

Приклонский В. А. Грунтоведение. Ч. 1. М., Гос. науч.-тех. изд-во лит. по геологии и охране недр. 1955, разд. III.
Строительные нормы и правила, СНиП 11-Б.2—62. Основания и фундамент зданий и сооружений на просадочных грунтах. М., Госстройиздат, 1962.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.		Стр.
Предисловие	3	Удельный вес	105
Введение	4	Естественный объемный вес	106
Предмет, задачи грунтоведения и его подразделения	4	Объемный вес скелета породы (объемный вес сухой породы)	108
Связь грунтоведения с другими науками	7	Объемный вес породы под водой	110
Краткие сведения об истории развития грунтоведения	8	Пористость	111
Основные учебники и учебные пособия по грунтоведению	12	Критическая пористость песков	116
Литература	14	Относительная плотность и уплотненность песков	118
Глава 1. Инженерно-геологические классификации горных пород	15	Степень уплотненности глинистых пород	118
Общая классификация (15). Специальные, отраслевые и региональные классификации (24).		Степень влажности (относительная влажность)	120
Контрольные вопросы	25	Контрольные вопросы	124
Литература	25	Литература	124
Глава 2. Показатели состава, состояния и физико-механических свойств горных пород	26	Глава 8. Консистенция глинистых пород	125
Контрольные вопросы	39	Формы консистенции и характерные влажности	125
Литература	39	Факторы, определяющие пластичность	126
Глава 3. Минералогический состав горных пород и его инженерно-геологическое значение	40	Практическое использование пределов пластичности	129
Первичные нерастворимые в воде минералы (40). Вторичные нерастворимые в воде минералы (41). Вторичные растворимые в воде минералы (45). Органические соединения (46). Об изучении минералогического состава глинистых пород (47).		Методы определения пределов пластичности	131
Контрольные вопросы	48	Контрольные вопросы	132
Литература	48	Литература	132
Глава 4. Гранулометрический состав пород без жестких связей	49	Глава 9. Водные свойства пород	133
Классификация фракций и пород по гранулометрическому составу (50). Методы изучения гранулометрического состава (53). Графическая обработка и практическое использование данных гранулометрического анализа (56).		Растворимость пород	133
Контрольные вопросы	61	Набухание	135
Литература	61	Усадка	136
Глава 5. Структура, текстура, трещиноватость, структурные связи и их геологическое значение	62	Размокание и размягчаемость глинистых горных пород	137
Структура пород	63	Водопроницаемость	138
Структура пород с жесткими связями (63). Структура песчаных и крупнообломочных пород (63). Структура глинистых пород (67). Структура почв (69).		Влажность и водоотдача пород	142
Текстура пород	70	Контрольные вопросы	144
Текстуры магматических пород (71). Текстуры метаморфических пород (71). Текстуры осадочных сцементированных пород (72). Текстуры рыхлых обломочных пород (74). Текстуры глинистых пород (75).		Литература	144
Структурные связи	76	Глава 10. Коллоидные свойства тонкодисперсных глинистых пород	145
Сложение	79	Электрокинетические явления в глинистых породах (145). Явления поглощения (146). Коагуляция (150). Пептизация (152). Тиксотропные явления в тонкодисперсных породах (152).	
Трещиноватость пород	80	Контрольные вопросы	154
Контрольные вопросы	83	Литература	154
Литература	83	Глава 11. Электропроводность горных пород	155
Глава 6. Газы и вода в горных породах и их инженерно-геологическое значение	84	Факторы, определяющие электропроводность пород (155). Методы определения электрических свойств пород (158).	
Газы в горных породах	84	Контрольные вопросы	159
Вода в горных породах	88	Литература	159
Связанная вода (90). Капиллярная вода (98). Свободная вода (100).		Глава 12. Теплофизические свойства пород	160
Контрольные вопросы	102	Контрольные вопросы	162
Литература	102	Литература	162
Глава 7. Физические свойства и состояние пород	103	Глава 13. Механические свойства пород с жесткими связями между зернами (твердых — скальных)	163
Влажность пород	104	Деформационные свойства пород с жесткими связями (163). Механическая прочность пород с жесткими связями между зернами (169). Твердость пород с жесткими связями (172). Крепость пород с жесткими связями (173). Разрабатываемость и разрыхляемость (175). Реологические свойства горных пород (175). Сейсмоакустические методы изучения массивов пород (180).	
		Контрольные вопросы	184
		Литература	184
		Глава 14. Сжимаемость (деформационные свойства) несцементированных (дисперсных) пород	185
		Компрессия пород (187). Методика и приборы для проведения компрессионных испытаний (194). Просадочность (195). Определение показателей деформационных свойств пород при трехосном сжатии с ограниченным боковым расширением	

	<i>Стр.</i>
ем (198). Одноосное сжатие (200). Полевые способы определения сжимаемости пород (201).	
Контрольные вопросы	205
Литература	205
<i>Глава 15. Сопротивление пород сдвигу</i>	206
Сопротивление сдвигу песчаных пород (207). Сопротивление сдвигу глинистых пород (210). Лабораторные методы определения сопротивления сдвигу (213). Полевые способы определения сопротивления сдвигу (219).	
Контрольные вопросы	222
Литература	223
<i>Глава 16. Общая характеристика основных групп пород и почв как грунтов</i>	224
Краткая характеристика пород класса А (твердых — скальных)	224
Группа магматических пород (224). Группа метаморфизованных пород (229). Группа осадочных цементированных пород (233).	
Краткая характеристика пород класса Б (дисперсные породы)	237
Группа осадочных пород (237). Группа почв (243). Группа искусственных — антропогенных грунтов (246).	
Контрольные вопросы	247
Литература	247
<i>Глава 17. О формировании физико-механических свойств горных пород</i>	248
Роль процессов литогенеза в формировании физико-механических свойств осадочных горных пород	250
Осадконакопление (250). Метаморфизм (254).	
Выветривание	255
Некоторые выводы по процессам формирования физико-механических свойств осадочных пород	264
Контрольные вопросы	265
Литература	266
√ <i>Глава 18. Значение геологических и других природных факторов для инженерно-геологической оценки горных пород</i>	267
Возраст пород (267). Условия залегания пород (268). Гидрогеологические условия (269). Другие природные факторы (269).	
Контрольные вопросы	270
<i>Глава 19. Основы мелиорации горных пород в строительных целях</i>	271
Способы мелиорации пород с жесткими связями	272
Цементация (272). Глиннизация (274). Горячая битумизация (274).	
Способ мелиорации пород без жестких связей	276
Замораживание (276). Силикатизация (280). Холодная битумизация песков (283). Виброуплотнение песков (283). Электродренаж глинистых пород (284). Физико-химические способы изменения свойств глинистых пород (285). Уплотнение слабых пород песчаными сваями (286). Методы искусственного укрепления пород при дорожном и аэродромном строительстве (287). Укрепление просадочных лёссов и лёссовидных пород (291). Уплотнение набивными сваями (292). Поверхностное уплотнение просадочных пород (292).	
Контрольные вопросы	293
Литература	293