М. В. СЕДЕНКО

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

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

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
МОСКВА 1971

УДК 551.49+624.131.1 (075.8)

Гидрогеология и инженерная геология. *Сеёенко М. В.* М., изд-во «Недра», 1971, стр. 272

Изложены основы гидрогеологии и инженерной геологии: круговорот воды в природе, происхождение подземных вод, условия их распространения и движения, физические свойства и химический состав, методы изучения подземных вод для целей водоснабжения и при разведке месторождений полезных ископаемых, способы борьбы с подземными водами при ведении горных работ; описаны физико-механические свойства горных пород, физико-геологические и инженерно-геологические процессы и явления, методика инженерно-геологических исследований для целей строительства различных сооружений.

Таблиц 13, иллюстраций 100, библиография — 53 наименования.

28998

2/3 1024

3—2—6
2—71

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник предназначен для студентов вузов по специальностям: «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых», «Техника разведки месторождений полезных ископаемых», «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» и «Геологическая съемка и поиски месторождений полезных ископаемых».

Как известно, подземные воды при разработке месторождений полезных ископаемых имеют весьма существенное значение, обусловливая необходимость проведения мероприятий по борьбе с притоками подземных вод в горные выработки. Выбор тех или других осушительных мероприятий и их эффективность всецело зависят от характера гидрогеологических условий месторождения и степени гидрогеологической изученности конкретных месторождений. В соответствии с этим инженеры-геологи, под непосредственным руководством которых осуществляются все разведочные работы, а также ведущие всю полевую производственно-техническую и геологическую документацию при бурении, должны обладать необходимым минимумом знаний по гидрогеологии и инженерной геологии, что является совершенно необходимым условием для обеспечения нужного качества разведочных работ.

ВВЕДЕНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ КУРСА ГИДРОГЕОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

Гидрогеология — наука о подземных водах. Она изучает их происхождение и формирование, условия распространения, законы движения, режим и запасы, физические свойства, химический и газовый состав, их взаимосвязь с атмосферными и поверхностными водами, занимается изучением вопросов практического использования подземных вод для водоснабжения и орошения, а также разработкой мероприятий по борьбе с подземными водами при строительстве и эксплуатации различных объектов и ведении горных работ.

Гидрогеология охватывает значительный круг вопросов, изучаемых другими науками, и поэтому находится в тесной связи с метеорологией, климатологией, гидрологией, почвоведением, геоморфологией, литологией, тектоникой, геохимией, физикой, химией, гидродинамикой, гидравликой, горным делом и др.

В жизни людей подземные воды играют исключительно важную роль. По выражению академика А. П. Карпинского, подземные воды являются наиболее драгоценным ископаемым. Издавна подземные воды используются человеком для питьевого и хозяйственно-технического водоснабжения.

Во многих отраслях народного хозяйства подземные воды играют отрицательную роль. При строительстве гидротехнических, промышленных и гражданских сооружений, тоннелей, метрополитенов, военных оборонительных объектов и т. п. подземные воды значительно осложняют ведение работ, обусловливая необходимость применять дренажные и гидроизоляционные мероприятия, нередко очень сложные, что часто значительно удорожает строительство.

В горнодобывающей промышленности подземные воды играют весьма существенную и в основном отрицательную роль. В практике горного дела известны довольно многочисленные случаи, когда внезапные прорывы подземных вод в горные выработки выводили из строя отдельные участки и шахту в целом на тот или иной срок, иногда прорывы вод сопровождались гибелью людей.

Гидрогеология — наука геологическая. Как видно из сказанного, круг вопросов, решаемых гидрогеологией, весьма обширен, в силу

чего гидрогеология подразделяется на ряд разделов. Самостоятельными разделами современной гидрогеологии являются [45]: общая гидрогеология, динамика подземных вод, методика гидрогеологических исследований, гидрогеология месторождений полезных ископаемых, региональная гидрогеология, учение о режиме и балансе подземных вод, шахтная и рудничная гидрогеология, гидрогеология лечебных, промышленных и термальных вод, радиогидрогеология, нефтепромысловая гидрогеология, мелиоративная гидрогеология.

Особо важным разделом гидрогеологии является *гидрогеохимия*, имеющая большое значение и для других геологических наук, базирующаяся на законах химии и геохимии и лежащая в основе гидрогеохимических методов поисков различных полезных ископаемых (твердых, жидких и газообразных).

Дальнейшее плодотворное развитие гидрогеологии как науки выдвигает необходимость: использования новейших методов исследования и изучения химического, газового и бактериологического состава подземных вод; применения изотопов (для определения характера движения подземных вод, скорости их движения, источников питания и особенностей разгрузки вод в артезианских бассейнах, закономерностей смешения вод различного генезиса, определения возраста подземных вод, скорости круговорота вод в различных зонах литосферы и решения других задач); разработки методов искусственного восполнения запасов подземных вод, опреснения излишне минерализованных вод, методов подсчета запасов подземных вод, очистки нефтяных, шахтных и других сточных вод; разработки оптимально-рационального водохозяйственного баланса (выбор наивыгоднейших источников водоснабжения, типа водозаборов, их расположение, регулирование водозабора в целях недопущения истощения подземных вод и ухудшения их качества) для отдельных районов, областей, республик и страны в целом.

Решение всех этих проблем в их совокупности с каждым годом приобретает все большее научное и практическое значение, поскольку в ближайшие десятилетия в связи с быстрым ростом народонаселения Земли и бурным развитием промышленности может возникнуть проблема водного голода.

Инженерная геология — отрасль геологии, изучающая верхнюю часть литосферы в связи со строительством различных сооружений. Возводимые объекты вызывают соответствующие изменения природных геологических условий, а измененная природная обстановка в сочетании с естественной в свою очередь влияет на условия строительства и эксплуатацию дорог, гидротехнических сооружений и других объектов. Отсюда следует, что теоретической и практической задачей инженерной геологии является прогнозирование геологических процессов, вызываемых хозяйственной деятельностью человека, и разработка мероприятий, обеспечивающих устойчивость и нормальную эксплуатацию сооружений, возводимых в различных геологических условиях.

Инженерная геология тесно связана с рядом наук: физикой, химией, механикой, реологией, геологией, гидрогеологией и др.

Значение инженерной геологии для развития народного хозяйства исключительно велико. Строительство грандиозных гидротехнических сооружений на Волге, Днепре, Каме, Иртыше, Оби, Енисее, Ангаре, промышленных и гражданских зданий, метрополитенов, железных и автомобильных дорог, горных предприятий и других объектов, строительство различных сооружений в условиях многолетнемерзлых пород требуют проведения широких инженерно-геологических исследований для изучения геологического строения районов строительства, их геоморфологии, гидрогеологических особенностей, свойств грунтов, изучения физико-геологических и инженерно-геологических процессов. Это дает возможность при проектировании сооружений учесть все природные особенности места строительства и предусмотреть необходимые профилактические мероприятия, предохраняющие сооружения от различного рода деформаций и обеспечивающие их нормальную эксплуатацию.

По утверждению основоположника инженерной геологии как науки акад. Ф. П. Саваренского (1939 г.), для возведения инженерного сооружения обыкновенно не столько опасны неблагоприятные геологические условия, сколько опасно недостаточное знание этих геологических условий и неумение оценить их с точки зрения того или иного инженерного мероприятия.

РОЛЬ РУССКИХ И СОВЕТСКИХ УЧЕНЫХ В РАЗВИТИИ ГИДРОГЕОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

Значение подземных вод в геологических процессах и горном деле впервые было отмечено гениальным русским ученым М. В. Ломоносовым. В своих классических работах он показал необходимость изучения «подземельных» вод в связи с вмещающими их породами.

Большую роль в изучении подземных вод России сыграли экспедиции Академии наук, которые начиная со второй половины XVIII века проводили систематическое комплексное изучение природных богатств Российского государства. В работах экспедиций принимали участие крупные русские ученые С. П. Крашенинников, В. Ф. Зуев, Н. И. Лепехин, Н. Ф. Озерецковский, В. М. Севергин и др., внесшие значительный вклад в дело изучения природы страны в целом, в том числе и подземных вод. В течение XIX и начале XX века в изучении подземных вод страны принимали участие Г. Е. Шуровский, Г. Д. Романовский, Н. А. Головкинский, С. Н. Никитин, И. И. Синцов, Н. А. Соколов, И. В. Мушкетов, А. Д. Архангельский и др., работы которых сыграли значительную роль в развитии отечественной гидрогеологии.

В конце XIX века знаменитым русским ученым Н. Е. Жуковским была разработана теория фильтрации подземных вод на основе принципов гидромеханики.

Работы русского ученого-почвоведа В. В. Докучаева оказали плодотворное влияние на многие области естествознания; его работы о зональности почв оказали глубокое влияние на развитие учения о зональности грунтовых вод, которое с успехом развивали П. В. Отоцкий, В. С. Ильин, а в наше время Г. Н. Каменский, О. К. Ланге, Н. И. Толстихин и др.

Бурное развитие гидрогеологии началось в годы Советской власти. Гидрогеологические исследования приобрели государственную важность и проводятся в огромных масштабах во всех уголках нашей необъятной Родины в связи с общим быстрым темпом развития всего народного хозяйства страны. Именно в эти годы гидрогеология выделилась в самостоятельную научную дисциплину.

Из наиболее крупных советских ученых, с именами которых связано развитие гидрогеологии, следует упомянуть академиков В. И. Вернадского, Н. Н. Павловского, Ф. П. Саваренского и Л. С. Лейбензона, профессоров А. Ф. Лебедева, Н. Ф. Погребова, Г. Н. Каменского, О. К. Ланге, А. Н. Семихатова, В. А. Приклонского, Н. И. Толстихина и многих других.

В СССР в настоящее время имеется свыше 10 специализированных научно-исследовательских институтов (ВСЕГИНГЕО, ВОДГЕО, ВНИИГИМ, ВСЕГЕИ и др.), выполняющих и координирующих гидрогеологические исследования практически по всем проблемам современной гидрогеологии. Большую исследовательскую работу по гидрогеологии проводят научные работники вузов (МГРИ, МГУ, ЛГИ и др.).

Из зарубежных ученых, способствовавших развитию гидрогеологии, следует упомянуть А. Дарси, К. Кейльгака, Е. Принца, О. Э. Мейнцера и др.

В дореволюционной России инженерной геологии как науки не существовало. В тот период крупнейшие русские ученые И. В. Мушкетов, А. П. Павлов, В. А. Обручев, К. П. Богданович, Д. Л. Иванов и многие другие, принимавшие участие в геологическом обслуживании разнообразных строительных объектов, главным образом железных дорог, накапливали лишь первоначальные сведения о составе и свойствах грунтов, о влиянии физико-геологических процессов и явлений на условия строительства возводимых сооружений, их трудами создавались лишь необходимые предпосылки для последующего развития инженерной геологии.

После Великой Октябрьской социалистической революции инженерно-геологические исследования получили огромное развитие. Строительство крупнейших гидротехнических объектов на Днепре, Волге, Енисее, Ангаре и других реках, канала им. Москвы, Беломоро-Балтийского канала, Турксиба, Урало-Кузнецкого промышленного комплекса, Московского метрополитена и многих других объектов потребовало соответствующего инженерно-геологического обоснования.

Развитие инженерной геологии в СССР неразрывно связано с жизнью и деятельностью акад. Ф. П. Саваренского, который

бесспорно считается основоположником этой отрасли научных знаний. Используя колоссальный опыт инженерно-геологических исследований, проведенных в годы первых пятилеток, а также опыт крупнейших ученых-геологов дореволюционного периода, Ф. П. Саваренский наиболее полно, глубоко и всесторонне обосновал предмет, задачи и содержание инженерной геологии, методику инженерно-геологических исследований и место инженерной геологии среди других научных дисциплин.

Одним из основных разделов инженерной геологии является «Общее грунтоведение», основоположником которого является крупный русский ученый М. М. Филатов, организовавший в двадцатых годах текущего столетия в Московском государственном университете кафедру грунтоведения.

В развитии механики грунтов большую роль сыграл проф. А. М. Герсеванов, ставший во главе созданного в 1931 г. Всесоюзного института оснований (ныне НИИОПС). Исследованиями проф. Н. А. Цытовича и др. в механике грунтов выделился особый раздел «Механика мерзлых грунтов», что имеет существенное значение в связи с освоением северных и северо-восточных районов нашей страны, где выявлены и осваиваются богатейшие природные богатства.

Помимо работ указанных ученых существенное значение в развитии инженерной геологии имели исследования В. В. Охотина, И. В. Попова, В. А. Приклонского, Н. Я. Денисова, Е. М. Сергеева, Н. Н. Маслова и многих других.

ГЛАВА I

ОБЩИЙ КРУГОВОРОТ ВОДЫ В ПРИРОДЕ

§ 1. Современные основы учения о подземной гидросфере

Большая часть воды на нашей планете находится в ее недрах [13, 20, 46]. В верхних частях земной коры первыми от поверхности являются подземные воды со свободной поверхностью, называемые грунтовыми водами. Ниже, где залегают различные по литологическому составу, пористости и трещиноватости горные породы, образуются огромные бассейны подземных вод многоэтажного строения, обычно высоконапорных, весьма разнообразных по химическому, газовому составу и температуре. В этой же зоне литосферы в значительных количествах вода имеется в физически и химически связанном состоянии. В осадочной толще бурением вода вскрывается на глубинах до 8 *км*.

Еще ниже вода в различных фазовых состояниях имеется в гранитной и базальтовой зонах земной коры и подстилающих ее подкоровых образованиях — верхней мантии, откуда она поднимается к земной поверхности с магмой и в расплавах вулканических лав.

В. И. Вернадский считал, что вода вездесуща, входя в состав всех минералов и горных пород. По современным воззрениям [15, 22, 50], все виды воды, входящие в горные породы в виде пара, в свободном капельножидком, физически и химически связанном состоянии, составляют колоссальнейший планетарный подземный океан Земли, с особыми во всех своих проявлениях формами существования и распределения вод. Но в более узком понимании, по Ф. П. Саваренскому, под подземными водами понимают капельножидкую воду, заполняющую пустоты и поры в горных породах, передвигающуюся в них под действием в основном гравитационных сил.

2. Роль воды в истории Земли

Роль воды в развитии планеты исключительно велика. Еще М. В. Ломоносов считал воду геологическим фактором, действовавшим в весьма отдаленном прошлом. В. И. Вернадский роль воды

оценивает в свете ее повсеместности, утверждая, что в земной коре ее роль была неизменно исключительной в течение почти всего, если не всего геологического времени. Это геологический фактор первостепенного значения. Нет природного тела, которое могло бы сравниться с нею по влиянию на ход основных, самых грандиозных геологических процессов.

Вода участвует в окислительно-восстановительных процессах, в процессах гидролиза, выщелачивания, дифференциации и транспортировке вещества планеты, она во многом определяет климат, самым непосредственным образом влияет на структуру самой внешней оболочки земной коры.

Образование гидросферы на Земле, согласно воззрениям акад. Н. М. Страхова, началось на самой ранней стадии ее геологической истории 4,5—5 млрд. лет тому назад. На рубеже позднего архея — раннего протерозоя (2,6 млрд. лет тому назад), когда произошло расчленение земной коры на относительно устойчивые платформенные и геосинклинальные области, образовались океанические впадины и эпейрогенические моря, являющиеся местами аккумуляции терригенного материала и осаждения продуктов органической жизни и химических процессов, что обусловило образование огромных толщ осадочных пород и самых разнообразных полезных ископаемых: руд черных металлов, бокситов, фосфоритов, солей, угля, нефти, газа, нерудных и многих других («Природа», 1954, № 4).

Выщелачивая и растворяя, участвуя в процессах химического выветривания, являясь основной причиной многих физико-геологических и инженерно-геологических процессов и явлений, находясь в непрестанном движении, вода совершает на Земле огромную работу, преобразуя ее поверхность. «Возница природы» — так назвал воду Леонардо да Винчи. Перенося, сортируя и откладывая продукты выветривания и размыва, вода образует в руслах рек и прибрежной части морей россыпные месторождения металлов (золота, платины, олова и многих других), драгоценных камней и других полезных ископаемых.

Велика роль воды в образовании гидротермальных месторождений — многочисленной группы месторождений полезных ископаемых, образующихся из горячих водных растворов, которые выделяются в процессе кристаллизации и остывания изверженных горных пород. Проникновение рудоносных растворов происходит главным образом по трещинам и разломам, имеющимся в горных породах и достигающим иногда значительной протяженности. Закономерности образования гидротермальных месторождений, их структурные и текстурные особенности, формы залегания и т. п. рассматриваются в многочисленных специальных работах (В. А. Обручева, А. Г. Бетехтина, С. С. Смирнова и др.).

Нельзя не отметить и того, что органическая жизнь на Земле первоначально появилась в океанических водах.

§ 3. Распределение воды в атмосфере, на поверхности Земли и в литосфере

Вода в природе встречается в трех состояниях: парообразном, жидком и твердом. Переход воды из одного состояния в другое происходит в основном под влиянием солнечного тепла, а также жизнедеятельности растений и других факторов.

В атмосфере вода содержится в виде пара, капельножидком (в виде облаков и тумана) и твердом состоянии (ледяные кристаллы, град, снег). Всего в атмосфере в среднем содержится около 14 000 $км^3$ воды, преимущественно в виде пара. Но благодаря постоянному пополнению атмосферной влаги за счет испарения на поверхность Земли ежегодно выпадает около 520 тыс. $км^3$ осадков.

На поверхности Земли вода в жидком состоянии скапливается в океанах, морях, озерах, болотах, а также находится в виде ледников и снега, образуя г и д р о с ф е р у; основная масса воды гидросферы составляет Мировой океан — около 1370 млн. $км^3$. В водах Мирового океана в колоссальных количествах в растворенном виде находятся почти все элементы таблицы Менделеева, например золота около 10 млрд. $т$, серебра около 200 млрд. $т$, молибдена около 300 млрд. $т$ и т. д. (данные Л. А. Зенкевича). Существенное значение имеет наличие в морской воде т я ж е л о й в о д ы, которой содержится в ней примерно $2 \cdot 10^{13}$ $т$; теоретически запасов тяжелой воды как источника ядерной энергии хватит человечеству на миллиарды лет.

В земной коре — л и т о с ф е р е — вода содержится в различных видах: парообразном, физически связанном, жидком, твердом и химически связанном (цеолитная, кристаллизационная и конституционная).

Вода, находящаяся во всех живых организмах и растениях, образует воду б и о с ф е р ы.

Воды атмосферы, гидросферы, верхней части литосферы и биосферы находятся в самой тесной связи между собой. Испаряясь с поверхности океанов, озер, других водоемов и с суши, а также превращаясь в парообразное состояние в результате жизнедеятельности организмов, вода переходит в атмосферу, а из нее вновь выпадает на поверхность Земли в виде дождя, града, снега и других осадков, составляя звенья общего круговорота воды на Земле — одного из самых грандиозных транспортных процессов; это один из главных механизмов, обусловливающих формирование поверхности Земли, обмен веществ и энергии.

В ходе круговорота постоянно возобновляются водные ресурсы в атмосфере, на поверхности Земли, в биосфере и в верхней части литосферы. В ходе круговорота создается исключительное многообразие вод, их различие. Вместе с тем им присуще их главнейшее свойство — «единство». Все природные воды, где бы они ни находились, теснейшим образом связаны между собой и представляют единое целое (В. И Вернадский). Принципиальная схема единства

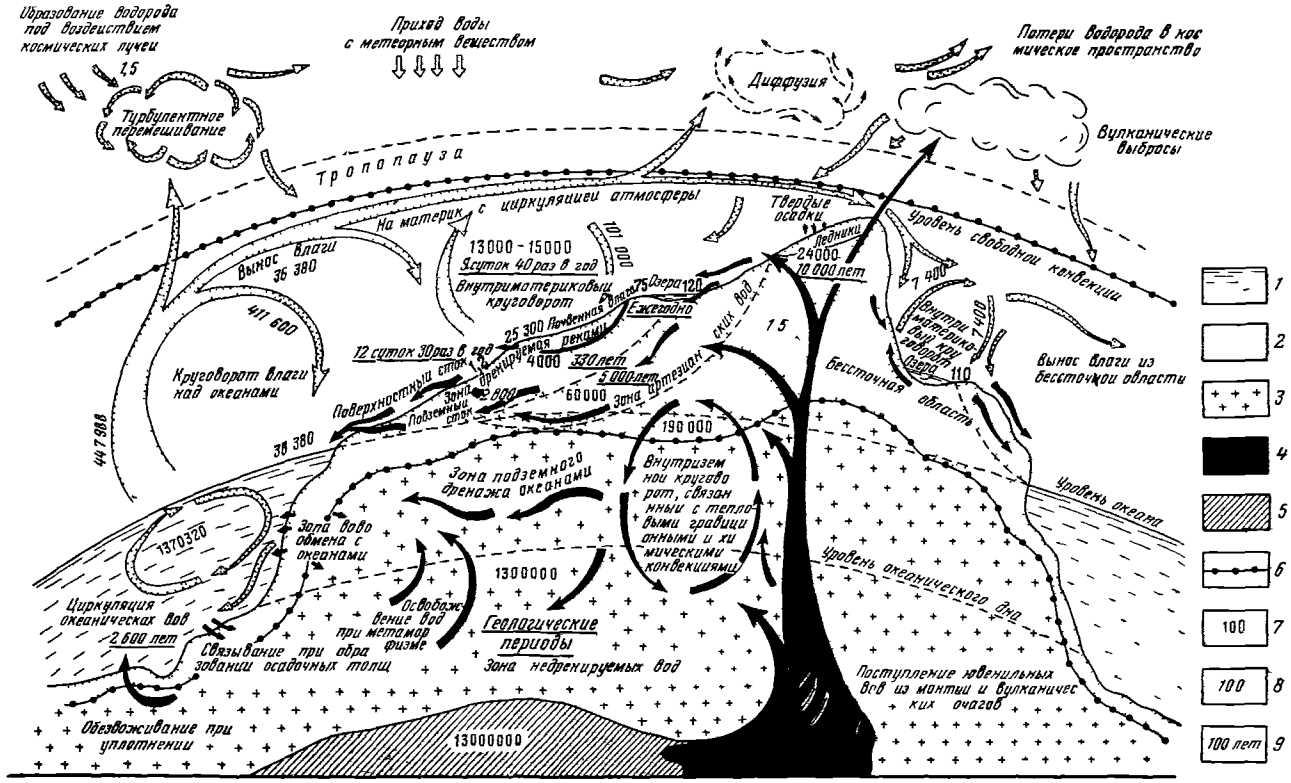


Рис. 1. Принципиальная схема единства вод Земли (по Л. С. Абрамову)

1 — свободные воды океана; *2* — чехол осадочных пород; *3* — кристаллические породы земной коры; *4* — магматический очаг; *5* — породы мантии; *6* — верхняя и нижняя границы зоны интенсивного водообмена; *7* — одновременные запасы вод в тыс. км³; *8* — суммарные объемы воды за год в км³, *9* — время полного возобновления запасов воды

вод Земли показана на рис. 1. На рис. 1 нанесены цифры трех видов прямые показывают одновременные (статические) запасы воды (в тыс. *км*³) в различных звеньях круговорота (океанах, реках, ледниках, запасы подземных вод в различных слоях земной коры), курсивом — суммарные возобновляемые объемы воды за год (в *км*³); подчеркнутые — время полного возобновления запасов (время круговорота).

Процессы перехода воды из одной сферы Земли в другую являются весьма сложными, составляя общий круговорот воды в природе, который слагается из испарения, осадков и стока (поверхностного и подземного). Различают большой, малый и внутриматериковый, или местный, круговороты. При большом круговороте часть воды, испарившейся с водной поверхности

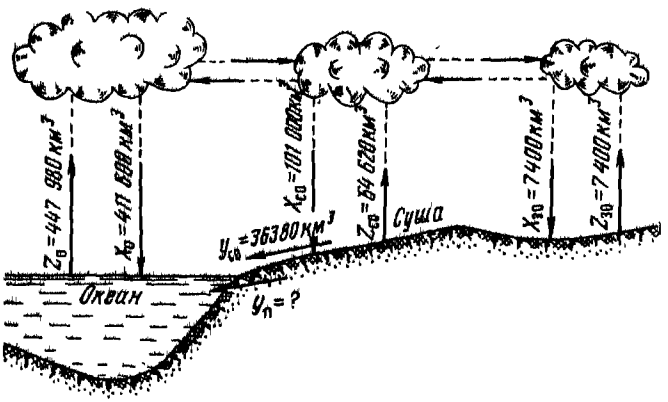


Рис. 2. Схема круговорота воды на Земном шаре (по М. И. Львовичу) X_o — осадки на океан; Z_o — испарение с океана; X_{co} — осадки в сточных областях суши; Z_{co} — испарение в сточных областях суши; X_{no} — осадки в замкнутых областях суши; Z_{no} — испарение в замкнутых областях суши; y_{co} — поверхностный сток в океан; $y_п$ — подземный сток в океан

океанов и морей, ветром переносится на сушу и там выпадает в виде осадков, которые затем расходуются на поверхностный и подземный сток и испарение. При малом круговороте вода, испарившаяся в пределах океанов и морей, выпадает здесь же. При внутриматериковом круговороте испарившаяся в пределах материков (с поверхности озер, болот, рек, с суши и при помощи растительности) вода вновь выпадает на материке. На рис. 2 показана схема круговорота воды на земном шаре с указанием абсолютных величин элементов баланса влагооборота.

В общепланетарном масштабе круговорот воды схематически показан на рис. 3.

Количество испаряющейся воды, количество осадков, их распределение на поверхностный и подземный сток, в целом взаимопереход вод атмосферы, гидросферы и литосферы зависят от температуры, давления и метеорологических факторов, а также от рельефа, геологического строения территории, литологического состава пород, характера растительности и других условий. Поэтому при гидрогеологическом изучении какого-либо района или месторождения наряду с изучением рельефа, геологии, литологии и других геологи-

ческих условий необходимо также знать и метеорологическую обстановку; силу и направление ветров, изменения температуры во времени, количество испаряющейся воды, количество осадков и их характер (дождь, снег, роса, иней), распределение осадков по временам года, поверхностный сток и другие факторы, влияющие на условия образования подземных вод.

Обычно метеорологические данные берутся с ближайшей метеостанции, на основе чего в общем отчете по проведенным работам дается и климатологическая характеристика изученного района.

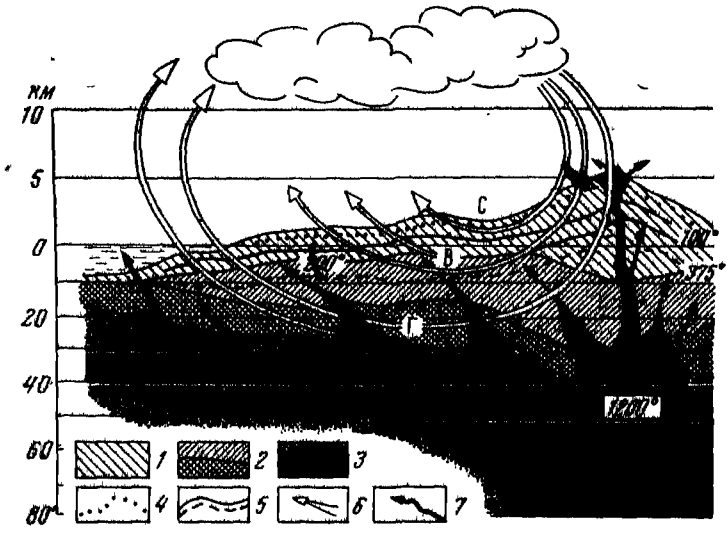


Рис. 3. Схема питания и круговорота подземных вод (по Ф. А. Макаренко)

1 — осадочные породы; в них приурочены грунтовые и напорные воды; *2* — граниты и базальты; трещинные и жильные воды; *3* — верхняя мантия и очаги магмы; воды, выделяющиеся из расплавов; *4* — охлажденные пресные воды зоны интенсивных циклов круговорота (выше местных базисов дренирования); *5* — зоны горячих, перегретых и надкритических минерализованных вод и растворов; *6* — циклы водных круговоротов: С — сезонных и других кратковременных; Б и Г — вековых и геологических; *7* — первичные и другие воды мантии и земной коры

§ 4. Баланс вод Земли

Баланс воды на земном шаре — количественное выражение процесса круговорота воды и его отдельных звеньев. На рис. 2 показаны некоторые элементы баланса. В табл. 1, составленной М. И. Львовичем, приведены элементы водного баланса Земли и отдельных его частей.

Водный баланс Земли и время возобновления запасов его отдельных звеньев характеризуются такими цифрами *. В Мировом океане сосредоточено 1 370 320 тыс. $км^3$ воды и возобновляется этот огромный объем за 2600 лет. В атмосфере одновременно содержится 13—

* «Водный голод планеты». М., изд-во «Знание», 1969.

Таблица 1

Годовой водный баланс Земли

Элементы водного баланса	Объем, км³	Слой, мм
Периферийная часть суши (117 504 тыс. км²)		
Осадки	101 000	859
Речной сток	36 380	309
Испарение	64 620	550
Замкнутая часть суши (41 355 тыс. км²)		
Осадки	7400	238
Испарение	7400	238
Мировой океан (361 145 тыс. км²)		
Осадки	411 600	1140
Приток речных вод	36 380	100
Испарение	447 980	1240
Земной шар (510 083 тыс. км²)		
Осадки	520 000	1020
Испарение	520 000	1020

15 тыс. км³ влаги и это количество полностью меняется каждые девять суток. Одновременный объем воды в реках составляет 1,2 тыс. км³ и воды рек меняются за каждые 12 *суток*; за год в моря и океаны стекает 36 тыс. км³ воды. Общие запасы подземных вод в земной коре составляют 1300 млн. км³, из них межпластовые воды составляют всего 60 млн. км³, в том числе в зоне активного водообмена лишь 4 млн. км³. Возобновляются межпластовые воды примерно за 5000 лет, зоны активного водообмена — за 333 года, а воды в глубоких зонах литосферы (замедленного и весьма замедленного водообмена) в течение геологических масштабов (за миллионы, десятки и сотни миллионов лет). В ледниках сосредоточены наибольшие запасы пресных вод Земли — 24—27 млн. км³ и возобновляются они в горных ледниках за 10 тыс. лет, а на крупных ледниковых щитах (Антарктиде) — за 200 тыс. лет. Запасы почвенной влаги составляют 75 тыс. км³; это очень важные ресурсы влаги, с ней связаны жизнь и продуктивность культурных растений, пастбищ, лесов и т. п. В озерах содержится около 230 тыс. км³, из них половина сосредоточена в проточных пресных озерах, возобновляемых за десятки лет; в озерах бессточных областей (Каспий и др.) с водами разной степени засоленности период их возобновления составляет 200—300 лет.

§ 5. Тепловые условия на Земле

Тепловые условия на поверхности Земли оказывают решающее влияние на общий круговорот воды в природе. Тепловые условия в разных широтах самые различные, что вообще обусловливается резко выраженной широтной зональностью природных явлений, первопричиной чего являются шарообразная форма Земли в сочета-

нии с вращением ее вокруг оси и наклоном эклиптики. Следовательно, температура в разных широтах и в разные времена года, а также в разные годы является самой различной. Различают следующие виды колебаний температуры: 1) суточные, 2) сезонные, 3) годовые, 4) многолетние, или вековые.

При гидрогеологической и особенно инженерно-геологической оценке изучаемой территории существенное значение имеет глубина промерзания пород, которая в основном определяется климатическими факторами. Так, в Иркутске глубина промерзания достигает 2,74 *м*, в Омске — 2,4 *м*, в Москве — 1,80 *м*, в Ленинграде — 1,77 *м*, в Киеве — 1,07 *м*, в Одессе — 0,82 *м*.

Амплитуда годовых колебаний температуры с глубиной уменьшается и на некоторой глубине (разной для разных районов) равна нулю; эта глубина называется *зоной постоянной годовой температуры*; вверх от этой зоны находится *гелиотермическая* толща литосферы, а вниз — толща, где температура увеличивается в соответствии с местным геотермическим градиентом.

Вековые колебания температуры распространяются на глубину свыше 800 *м*, что установлено на севере и северо-востоке Сибири (многолетняя мерзлота); здесь оттаивание летом и промерзание зимой распространяется на глубину от долей метра до 2—4 *м*, оттаивающе-промерзающий слой в области распространения многолетней мерзлоты называется *сезонно талым*, активным, или *деятельным*, и определение его величины в каждом конкретном месте имеет существенное значение при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях.

Термический режим подземных вод обусловливается термодинамическими условиями недр, в которых существует вода. Чем больше глубина, тем выше температура и давление. В парообразной форме вода присутствует в зоне аэрации, куда она проникает вместе с воздухом. На глубинах до 5—8 *км* вода содержится в жидком виде, а также в физически и химически связанном состоянии. С глубиной нарастают температура и гидростатическое давление самих вод, а также горных пород. При этом рост давления непрерывно опережает возможности превращения воды в пар даже при критической температуре (374,15° С). А так как критическая температура сильно минерализованных вод на глубинах повышается до 450—500° С и выше, то парообразная фаза вод не возникает даже в зонах, где образуется магма, растворяясь в ней при сверхкритических температурах.

28998

ГЛАВА I

ВОДА В АТМОСФЕРЕ И НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

§ 6. Влажность воздуха

Атмосферный воздух представляет собой смесь газов, состоящую из азота (78,1%), кислорода (21%) и аргона (0,9%), а также ничтожных количеств водорода, инертных газов (гелий, криптон, неон и ксенон), водяного пара, углекислого газа, озона и др.

Имеющийся в атмосфере водяной пар определяет собой так называемую влажность воздуха. Количество парообразной влаги в воздухе не всегда одинаково и зависит от температуры воздуха.

Влажность воздуха характеризуется удельной, абсолютной и относительной влажностью, а также дефицитом влажности. Удельная влажность — максимально возможное количество парообразной влаги в воздухе при данной температуре, измеряемое высотой ртутного столба в миллиметрах, уравновешивающего упругость пара. Удельная влажность воздуха в зависимости от его температуры изменяется в значительных пределах, о чем свидетельствуют данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Влажность воздуха при различных температурах (в °С)

Влажность	−30	−20	−10	0	10	20	30
В *мм рт. ст.*	0,4	1,0	2,2	4,6	9,2	17,5	31,9
В *г/м*^{3}	0,5	1,1	2,4	4,8	9,4	17,3	30,4

Абсолютная влажность — количество парообразной влаги, находящейся в воздухе в данный момент, также выражаемое в миллиметрах ртутного столба (или в миллибарах, один 1 *мбар* = $= {}^3/_4$ *мм рт. ст.*) или в граммах на кубометр. В теплых сухих воздушных массах абсолютная влажность может достигать 50 *г/м*^{3} и больше, а в холодном арктическом воздухе снижаться до 0,1 *г/м*^{3} и меньше. Над обширными водными пространствами и над увлажненной земной поверхностью абсолютная влажность воздуха обычно значительна, приближаясь нередко к удельной.

Относительная влажность R — отношение абсолютной влажности e к удельной E при той же температуре:

$$R = \frac{e}{E} \cdot 100\% \qquad (1)$$

Относительная влажность подвержена значительным изменениям в зависимости от ряда причин и колеблется от 30 до 90% и более.

В пасмурную погоду и при дожде относительная влажность воздуха может достигать 100%, что соответствует полному насыщению воздуха водяными парами при данной температуре. Температура, при которой происходит полное насыщение воздуха водяными парами, называется точкой росы. При уменьшении температуры ниже точки росы излишек влаги будет сжижаться; это явление называется конденсацией водяного пара.

Дефицит влажности, или недостаток насыщения d — разность между удельной E и абсолютной влажностью e:

$$d = E - e. \qquad (2)$$

Дефицит влажности имеет существенное значение при испарении; скорость испарения при прочих равных условиях тем значительнее, чем больше дефицит влажности.

Определяется влажность воздуха с помощью психрометров — приборов, состоящих из двух спаренных термометров; один из них является сухим, а другой — смоченным. Шарик смоченного термометра обтянут батистом, конец которого опущен в чашечку с дистиллированной водой. В результате капиллярности вода из чашечки поднимается по батисту и шарик термометра всегда смочен. Вода с батиста испаряется, на что тратится тепло, вследствие чего показания смоченного термометра всегда ниже показаний сухого; чем суше воздух, тем больше разница в показаниях термометров. Влажность воздуха определяется по разности показаний термометров с помощью специальных таблиц.

§ 7. Испарение

Испарением называется процесс превращения воды из жидкого состояния в парообразное под влиянием температуры. В атмосферу парообразования влага поступает путем испарения с поверхности океана, морей, озер, болот, поверхности влажной почвы и листьев растений. Подземные воды могут испаряться лишь на тех участках, где высота капиллярного поднятия достигает дневной поверхности.

Особым видом испарения является образование парообразной влаги в результате жизнедеятельности растений (травяной и древесной) — транспирация. Транспирация — физиологический процесс, связанный с ростом тканей растений. При образовании 1 *г* растительной ткани испаряется приблизительно 300—400 *г* воды. Испарение с растительного покрова всегда превышает испарение с обнаженной почвы. Предельная глубина, на которую сказывается влияние транспирации, определяется глубиной корневой системы растений. В засушливых районах корневая система некоторых растений достигает глубины 10 *м* и более.

Испарение на суше зависит от многих факторов: температуры, атмосферного давления, скорости движения ветра, дефицита влажности воздуха, количества осадков, характера растительного покрова,

характера пород и почвы, рельефа, экспозиции места, близости уровня подземных вод и др. Чем выше температура местности и скорость движения ветра, тем больше испарение; чем более влажен воздух, тем меньше испарение; чем более водопроницаемы породы и почвы, тем меньше испарение; со склонов южной экспозиции влаги испаряется больше; чем ближе к поверхности земли уровень грунтовых вод, тем больше испаряется влаги, поднимающейся по капиллярам в породах.

Испарение с водной поверхности, или *испаряемость*, зависит от температуры испаряющей поверхности, дефицита влажности воздуха, скорости ветра и атмосферного давления. Испарение подвержено суточным и годовым колебаниям; днем оно больше, чем ночью, летом больше, чем зимой.

Испарение имеет существенное значение при решении вопросов осушения, орошения, при гидрогеологических исследованиях и т. п.

Наблюдения за испарением с поверхности почвы производят при помощи почвенных испарителей. Подробное описание различных испарителей и работы с ними можно найти в руководствах по метеорологии.

§ 8. Атмосферные осадки

Как указывалось, вода в атмосфере содержится в виде водяного пара. В совершенно чистом воздухе сжижение водяных паров не происходит даже при охлаждении воздуха до точки росы и ниже. Для образования капелек жидкой воды, из которых состоят облака и туман, необходимо наличие в воздухе ядер *конденсации*, на поверхности которых и происходит сжижение водяного пара. В нижних слоях атмосферы содержатся многочисленные мелкие твердые частички (пыли, дыма, растительные споры и т. п.), обладающие гигроскопичностью или химическим сродством с водой, которые и являются ядрами конденсации.

Атмосферные осадки подразделяются на два типа: 1) осадки, образующиеся непосредственно на поверхности земли и наземных предметах вследствие понижения температуры воздуха до точки росы (роса, иней, изморозь и пр.); 2) осадки, выпадающие на поверхность земли из облаков (дождь, град, снег, крупа).

Количество осадков измеряется толщиной слоя воды в миллиметрах, который установился бы при отсутствии стока и испарения.

Интенсивность осадков — количество осадков, выпавших за 1 *мин*. Осадки с интенсивностью больше 0,5—1 *мм/мин* называются *ливнями*.

Количество атмосферных осадков не везде и не всегда одинаково. Осадки меняются с переменой места, а для одного и того же пункта — по сезонам и годам. Наибольшее количество осадков выпадает в Индии (Манойрам и Черрапунджи), где оно достигает 11 626—14 200 *мм*, а в иные годы 22 990 *мм*; наименьшее — в Чили (Копиано) — 17 *мм* и пустыне Атаками — 1—10 *мм*.

В пределах СССР атмосферные осадки выпадают крайне неравномерно по сезонам и по отдельным районам. В Европейской части летом осадков выпадает больше, чем зимой, а в Средней Азии летом количество осадков очень мало, а в иные годы равно нулю. Наибольшее количество осадков выпадает на Черноморском побережье Кавказа, от Сочи до Батуми — 1200—2870 *мм* в год. Максимальное количество осадков в СССР выпадает в Аджарии (до 3836 *мм*) и Сванетии (до 5000 *мм*). В средней полосе Европейской части СССР осадков выпадает 400—600 *мм* в год, в северных районах — 100—300 *мм*, в Прикаспийском районе — 150—200 *мм*. Атмосферные осадки в питании подземных вод зоны активного водообмена имеют решающее значение. При определении роли атмосферных осадков в питании подземных вод необходимо изучать и учитывать не только абсолютное количество осадков, но и их продолжительность, интенсивность, вид (жидкие, твердые), время выпадения, а также учитывать общие климатические, физико-географические и геологические условия изучаемой территории.

Количество выпадающих атмосферных осадков измеряется специальными приборами — д о ж д е м е р а м и, или о с а д к о м е р а м и, конструкция которых и методика работы описываются в специальных руководствах по климатологии.

§ 9. Поверхностный и подземный сток

Под стоком понимают ту часть атмосферных осадков и выходящих на поверхность подземных вод, которая реками выносится в моря и океаны. Поверхностный сток является одним из важнейших элементов круговорота воды в природе. Количество воды, идущей на поверхностный сток, зависит от ряда факторов: климата, вида осадков, рельефа местности, водопроницаемости горных пород, искусственных факторов (создание водохранилищ на реках, оросительных систем, полезащитных лесных полос и пр.).

Главным фактором стока являются климатические условия. Чем больше выпадает атмосферных осадков, чем меньше испарение, тем больше сток. В засушливых районах (юго-восток Европейской части СССР и Средняя Азия), где осадков выпадает очень мало, многие реки летом не имеют стока, пересыхают.

Различные виды осадков обусловливают различный характер стока. Продолжительные небольшой интенсивности обложные дожди, а также кратковременные дожди дают слабый сток. Сильные дожди и ливни вызывают значительный сток. Снеговой покров только весной, при таянии, дает сильный сток, обусловливая бурные паводки на реках.

Сильно расчлененный рельеф (в горах и при густой сети оврагов и балок) способствует быстрому стоку атмосферных осадков. Слабо расчлененный рельеф, особенно когда местность и склоны задернованы или покрыты кустарником и лесом, способствует замедлению стока.

Водопроницаемость пород существенно сказывается на стоке. Чем больше атмосферных осадков просачивается, превращаясь в подземные воды, тем меньше поверхностный сток.

Полезащитные лесные полосы, как правило, уменьшают поверхностный сток, способствуя просачиванию осадков. Крупные водохранилища оказывают весьма существенное влияние на сток, замедляя его и несколько уменьшая.

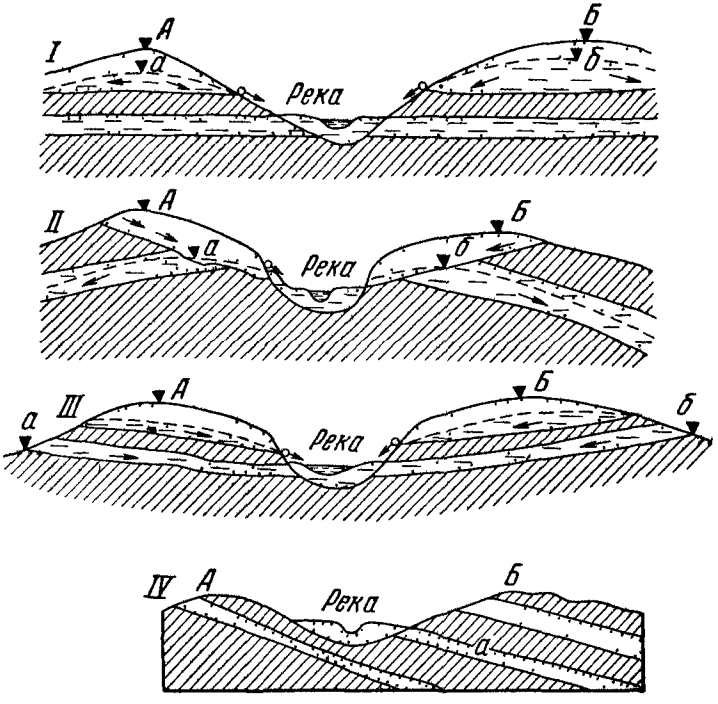


Рис 4. Соотношение бассейнов поверхностного и подземного стока (по П. П. Климентову)

I — бассейны поверхностного и подземного стока совпадают, *II* и *III* — то же, не совпадают, *IV* — питание за счет подземного стока отсутствует *А*, *Б* — бассейны поверхностного стока, *а*, *б* — бассейны подземного стока

Реки, через которые осуществляется сток, питаются осадками, идущими на сток, и подземными водами. Величина того или иного вида питания рек зависит от климата, геологического строения долины реки, рельефа, гидрогеологических условий и других факторов.

Подземные воды питают реки в результате дренирования водоносных горизонтов, когда склоны речных долин их пересекают. Равнинные реки СССР летом и осенью питаются одновременно за счет дождей и подземных вод, а зимой почти исключительно за счет последних.

Величина подземного стока зависит от соотношения между площадью водосборных бассейнов поверхностного и подземного стока и тектонических особенностей долины реки. На рис. 4 показано соотношение бассейнов поверхностного (*АБ*) и подземного (*аб*) стоков.

Величину стока определяют обычно для площади всего бассейна реки в ее устье, а также для любого другого участка реки. Для определения величины стока необходимо знать так называемый расход реки. Под р а с х о д о м р е к и понимается количество воды, протекающей в единицу времени через поперечное сечение живого потока воды. Чтобы определить расход реки в том или ином сечении, необходимо знать среднюю скорость движения воды в реке v (в *м/сек*) и площадь водного потока F (в $м^2$). Тогда расход определится умножением средней скорости на площадь сечения:

$$Q = vF \ м^3/сек. \tag{3}$$

Методика и техника определения расхода реки подробно излагается в курсах гидрометрии.

Основными характеристиками стока являются коэффициент стока и модель стока. К о э ф ф и ц и е н т о м с т о к а η называется отношение стока h за определенный период к количеству выпавших за тот же период осадков X в бассейне реки:

$$\eta = \frac{h}{X} \cdot 100\%. \tag{4}$$

Величина стока h определяется делением расхода реки на площадь ее бассейна и выражается в миллиметрах слоя воды.

М о д у л е м с т о к а называется количество воды, стекающее в единицу времени с 1 $км^2$ водосборной площади бассейна реки в литрах в секунду:

$$M = \frac{Q \ л/сек}{F \ км^2}. \tag{5}$$

Общий модуль стока включает в себя модули поверхностного и подземного стока. Максимальный модуль стока на равнинных реках СССР наблюдается в весеннее время, в период паводков, минимальный — зимой, когда реки питаются почти исключительно за счет подземных вод.

В гидрогеологии важно знать величину подземного стока на том или ином участке реки. Существуют многочисленные способы определения величины подземного стока. Одним из методов является гидрометрический, когда выбирается прямолинейный участок русла, не имеющий боковых притоков, и на нем замеряются расходы реки в верхней и нижней частях. Тогда величина подземного питания реки определится по формуле:

$$Q_п = Q_2 - Q_1, \tag{6}$$

где $Q_п$ — величина питания реки за счет подземных вод, $м^3/сек$;

Q_2 — расход реки в нижней части участка, $м^3/сек$;

Q_1 — то же, в верхней части участка, $м^3/сек$.

Этот способ дает вполне удовлетворительные результаты для рек, величина подземного питания которых значительна. Водосборная

площадь подземного питания приближенно определяется по геологическим и гидрогеологическим картам; определив водосборную площадь $F_п$ $км^2$, рассчитывают модуль подземного стока по формуле:

$$M_п = \frac{Q_п}{F_п} \; л/сек/км^2. \qquad (7)$$

Модуль подземного стока является надежным показателем при оценке водоносности горных пород, распространенных на площади водосборного бассейна реки, и используется при гидрогеологических расчетах.

Характеристики речного стока — коэффициент и модуль стока, а также расходы рек используются при проектировании и строительстве водохранилищ, гидроэлектростанций, оросительных систем, при решении вопросов водоснабжения и т. п.

ГЛАВА II

ВОДА В ЗЕМНОЙ КОРЕ

§ 10. Распределение воды в земной коре

Как указывалось, поверхностные и подземные природные воды представляют собой единое целое.

Верхнюю часть земной коры принято делить на зону аэрации и зону насыщения. В зоне аэрации вода присутствует в виде пара, в физически и химически связанном состоянии. В зоне насыщения поры или трещины в породах полностью заполнены свободной гравитационной водой. Граница между зоной аэрации и зоной насыщения определяется положением местного базиса аэрозии, что в свою очередь зависит от глубины эрозионного вреза местной гидрографической сети.

В вертикальном разрезе в верхней части земной коры в настоящее время выделяются следующие гидрогеодинамические зоны: зона интенсивного водообмена мощностью от десятков до нескольких сотен метров, зона замедленного водообмена глубиной до 3—4 *км* и зона весьма замедленного водообмена. Первая зона расположена в самой верхней части земной коры, в выступающих массивах древних докембрийских пород, в краевых частях артезианских бассейнов и верхних неглубоко залегающих водоносных горизонтах. Воды первой зоны являются современными, атмосферного происхождения, типа выщелачивания, по составу преимущественно гидрокарбонатными кальциевыми маломинерализованными и широко используются для питьевого, хозяйственного и технического водоснабжения. Только в условиях засушливого климата, где испарение преобладает над инфильтрацией, воды в первой зоне являются минерализованными, пестрыми по химическому составу, с преобладанием соленых хлоридных и сульфатных натриевых.

Воды второй зоны приурочены к более глубоким частям полураскрытых структур. Здесь распространены преимущественно седиментационные воды, лечебные, промышленные и термальные гидрокарбонатные натриевые, сульфатные натриевые или сульфатные натриево-кальциевые.

Воды третьей зоны приурочены к глубоким частям впадин, являются древними, погребенными и метаморфогенного происхождения, высокоминерализованными, по составу хлоридными кальциево-натриевыми и хлоридными магниево-натриевыми, воды этой зоны, являясь крепкими рассолами, с минерализацией до 300—650 *г/л*, имеют промышленное значение и используются для извлечения из них солей, брома, йода и других элементов.

В районах развития магматических очагов указанная зональность осложняется; здесь наблюдаются восходящие токи глубинных термальных вод и газов (особенно CO_2), образующихся частично из магмы в процессе ее кристаллизации, а частично из окружающих горных пород, подвергающихся метаморфизму. Восходящие токи гидротерм и газов смешиваются с ранее сформировавшимися водами, при этом состав последних меняется, в них вносятся новые растворенные вещества и газы. Характерным является насыщение вод углекислотой, что влечет за собой формирование разнообразных по составу углекислых минеральных вод.

Проведение границ между указанными гидрогеодинамическими зонами требует учета многообразных факторов и анализа геологической истории данного региона. Крупные впадины (синеклизы) представляют собой бассейны артезианских вод с характерным распределением подземных вод по химическому составу; в верхней части — гидрокарбонатные, в средней — сульфатные и в нижней — хлоридные. Поднятия представляют собой раскрытые структуры, где имеет место интенсивная циркуляция инфильтрационных вод. Наиболее сложные условия имеются в горно-складчатых областях и примыкающих к ним понижениях. Часто водоносные свиты, располагающиеся на высоких абсолютных отметках, создают благоприятные условия для глубокого промывания своих погруженных частей, а в областях погружения в вышележащих свитах могут залегать водоносные горизонты с более минерализованной водой. Примером этого является восточная и южная части Западно-Сибирской низменности, где отмечается подобное поэтажное расположение водоносных горизонтов, причем горизонты с маломинерализованной водой залегают ниже горизонтов с более минерализованной водой. Это объясняется тем, что области питания нижележащих водоносных горизонтов расположены в западных отрогах Алтая на высоких отметках.

§ 11. Виды вод в горных породах

В порах и трещинах горных пород всегда содержится вода, которая может находиться в парообразном, жидком и твердом состоянии. Существуют различные классификации видов воды в горных породах

[39, 41]. В инженерной геологии в настоящее время принята классификация видов воды, которая в первоначальном виде была предложена А. Ф. Лебедевым (1930 г.), но в последующем была уточнена в соответствии с новейшими представлениями о природе воды, строении ее молекулы и характере физико-химического воздействия воды с минеральными частицами пород.

1. Вода в форме пара.
2. Физически связанная вода (вода на поверхности частиц):
1) прочно связанная, или адсорбированная, вода;
2) рыхло или слабо связанная вода.
3. Капиллярная вода.
4. Свободная вода (гравитационная):
1) просачивающаяся;
2) вода грунтового потока (со свободной поверхностью);
3) вода напорного потока (с напорной поверхностью).
5. Вода в твердом состоянии.
6. Вода в кристаллической решетке минералов (химически связанная вода):
1) конституционная;
2) кристаллизационная;
3) цеолитная.

Вода в форме пара. Заполняет свободную часть пор в зоне аэрации. Под влиянием изменения температуры и давления парообразная влага может превращаться в капельножидкое состояние — *конденсироваться* или, наоборот, жидкая вода превращается в парообразное состояние. Тем самым парообразная влага в порах пород находится в постоянном динамическом равновесии с другими видами воды и с парами воды в атмосфере.

Физически связанная вода. Присуща преимущественно глинистым породам; в скальных и раздельнозернистых породах эта вода практического значения не имеет. Подразделяется на *прочно связанную* и *рыхло* или *слабо связанную*. Образование физически связанной воды обусловливается наличием у мелкодисперсных глинистых минералов, входящих в состав глинистых пород, поверхностной энергии, природа которой электростатическая; в природных условиях электростатическое поле, образующееся на поверхности мелкодисперсных минералов, имеет в целом отрицательный заряд.

Образование прочно связанной воды представляет собой единый процесс адсорбции диполей воды и катионов из порового раствора в их взаимодействии между собой и поверхностью минеральных частиц. Процесс гидратации начинается с образования связанной воды у наиболее активных центров адсорбции поверхности глинистых частиц; расположение молекул воды носит «островной» характер. При увеличении относительной влажности вокруг глинистых частиц образуется сплошной слой прочно связанной воды. Силы связи между поверхностью частицы и адсорбционным слоем катионов и молекул воды составляют около 10 000 *атм*, но радиус их действия мал (десятые доли микрона). По свойствам прочно связанная вода

отличается от обычной: плотность ее в среднем равна 1,5, она очень вязка, соли в ней не растворяются, замерзает она при температуре минус 78° С. Максимальное количество прочно связанной воды (ее часто именуют также *гигроскопической*) в песках не превышает 1%, в глинах — нескольких процентов. Глинистые породы при влажности, не превышающей максимальной гигроскопической влагоемкости, представляют собой относительно твердые породы.

Хотя молекулы воды и являются жесткими диполями, электрически они нейтральны. Благодаря этому их адсорбция или удаление с поверхности грунтовых частичек не влияет на величину заряда, присущего частицам. Этот заряд уравновешивается путем адсорбции из порового раствора ионов растворенных веществ. Уже указывалось, что заряд глинистых частиц отрицателен. Тем самым к поверхности грунтовых частиц из порового раствора притягиваются катионы. Если бы не проявлялось молекулярное тепловое (броуновское) движение, то около грунтовой частицы образовался бы неподвижный — адсорбционный слой катионов и молекул воды. Но тепловой эффект обусловливает образование около частиц и слоя подвижных катионов, которые в совокупности с катионами неподвижного слоя гасят заряд частицы. Подвижный слой катионов называется *диффузным*; катионы диффузного слоя называются *обменными*, или *поглощенными*.

Обменные катионы способны обмениваться с катионами порового раствора; этот процесс называется *ионным обменом*. Ионный обмен, широко распространенный и существенно влияющий на физико-механические свойства глинистых пород, имеет большое практическое значение. Общее количество ионов диффузного слоя глинистой тонкодисперсной частицы, способных к обмену с катионами порового раствора в данных условиях, называют *емкостью обмена*, или *поглощения, породы*. Количественно емкость обмена выражают в миллиграмм-эквивалентах *на 100 г сухой породы*.

От состава обменных катионов в значительной степени зависят физико-механические свойства глинистых пород, причем тем больше, чем больше емкость поглощения. Глины, насыщенные натрием, очень сильно набухают в воде, имеют малое сцепление, при действии внешней нагрузки сильно сжимаются; в сухом состоянии обладают значительной связностью и прочностью.

Глины, диффузный слой которых состоит из ионов кальция, слабее набухают в воде, под нагрузкой эти глины меньше сжимаются и имеют ряд других удовлетворительных механических свойств.

Искусственно меняя состав обменных катионов, можно изменять физико-механические свойства глинистых пород в желаемом для практических целей направлении, что широко используется в практике мелиорации грунтов.

Катионы диффузного слоя также притягивают к себе диполи воды и около них в свою очередь образуется гидратная оболочка. Схема образования гидратной оболочки около мелкодисперсной глинистой частицы показана на рис. 5. Вода диффузного слоя называется *рыхло*

связанной. Энергия связи между частицей и катионами диффузного слоя, а тем самым и рыхло связанной водой интенсивно убывает по мере удаления от поверхности частицы. Рыхло связанная вода называется также *пленочной*; вместе с прочно связанной она, по А. Ф. Лебедеву, называется *молекулярной* водой. Максимальное количество молекулярной воды, удерживаемой данной породой в данных условиях, А. Ф. Лебедев назвал *максимальной молекулярной влагоемкостью*. Эта влагоемкость примерно соответствует влажности нижнего предела пластичности (см. § 17).

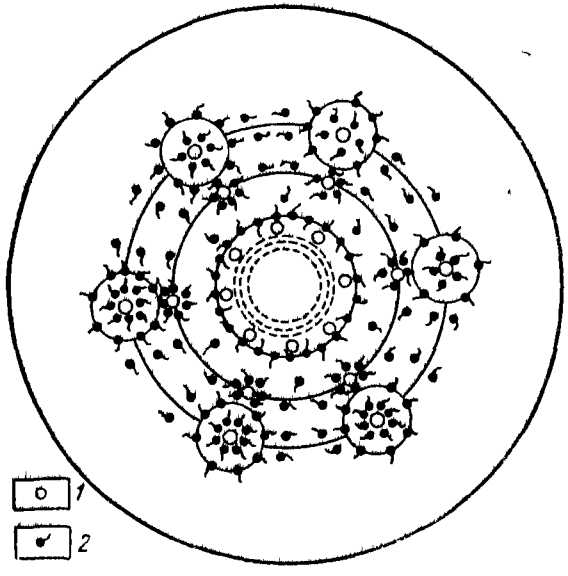


Рис. 5. Схема образования гидратной оболочки около коллоидной отрицательно заряженной частицы

1 — катионы; *2* — диполи воды

Величина гигроскопической и максимальной молекулярной влагоемкости для пород различного гранулометрического состава бывает самой различной; в глинистых породах величина влагоемкости зависит также от их минерального состава и характера катионов диффузного слоя.

Характерными свойствами рыхло связанной воды являются: более медленное передвижение по сравнению с передвижением свободной воды, в основном она передвигается по породам от мест, где толщина пленок большая, к местам, где пленки тоньше; прямая зависимость скорости ее передвижения от температуры; пониженная способность растворять соли; растворенные в ней соли передвигаются независимо от передвижения самой воды; замерзание при температуре ниже нуля, температура замерзания понижается тем больше, чем более дисперснее частицы; гидростатического давления рыхло связанная вода не передает.

Наличие в глинистых породах рыхло связанной воды придает этим породам ряд важных в строительном отношении свойств: лип-

кость, пластичность, набухание, усадку и др.; физико-механические свойства таких пород (сопротивление сжатию и сдвигу) изменяются в обратной зависимости от количества рыхло связанной воды.

Капиллярная вода является переходным типом между связанной и свободной — гравитационной водой. Она заполняет капиллярные пустоты в породах. В зависимости от того, сообщается ли подобная вода с уровнем грунтовых или нет, она подразделяется, по А. Ф. Лебедеву, на *капиллярно-подвешенную* и *собственно капиллярную*. Подвешенная вода не сообщается с уровнем грунтовых вод. Она удерживается в мелких порах и трещинах капиллярными силами. Образование капиллярно-подвешенной воды возможно в тех случаях, когда мелкозернистый грунт подстилается крупнозернистым; тогда в нижней части мелкозернистого слоя образуются мениски, обращенные выпуклостью вверх, которые и противодействуют передвижению подвешенной воды вниз. Собственно капиллярная вода поднимается от уровня подземных вод вверх по капиллярным пустотам под действием силы поверхностного натяжения на границе раздела воды и воздуха, образуя выше уровня подземных вод зону капиллярного насыщения, отделяясь от зоны аэрации *капиллярной каймой*.

В табл. 3 приведены значения предельной высоты подъема для некоторых разностей пород.

Таблица 3

Высота капиллярного подъема воды

Порода	Высота капиллярного подъема, см
Песок крупнозернистый	2—3
» среднезернистый	12—35
» мелкозернистый	35—120
Супесь	120—350
Суглинок	350—650
Глина	650—1200

В реальных условиях высота капиллярного подъема в глинистых породах зависит не только от диаметра пор, но также от химического состава воды, минерального состава глин, характера катионов диффузного слоя, структуры, текстурных особенностей и других факторов, в отдельных случаях она может достигать 6—7 *м* и более.

Величина капиллярного подъема имеет существенное значение в строительстве, так как может обусловить увлажнение фундаментов и нижней части стен, полотна железных дорог, автострад и других объектов, находящихся в зоне капиллярного подъема; это увлажнение создает сырость в помещениях, снижает прочность грунтов в основании сооружений, обусловливает (в сочетании с другими факторами) образование пучин на дорогах, засоление почв в засушливых районах и другие нежелательные явления, с которыми приходится вести борьбу.

Гравитационная вода представляет собой подземные воды, движущиеся в порах и трещинах горных пород под действием силы тяжести. Гравитационная вода обладает растворяющей способностью, передает гидростатическое давление, оказывает при движении механическое воздействие на породы. Гидростатическое давление воды, находящейся в порах пород, уменьшает вес скелета породы по закону Архимеда и оказывает взвешивающее давление на подошву сооружений, построенных на водонасыщенных породах. Механическое действие движущейся воды на породы проявляется в выносе мелких частиц из рыхлых несвязных пород на откосах выемок и котлованов — *суффозии*, что может обусловить неустойчивость откосов и последующую деформацию склонов. В зоне насыщения гравитационные воды образуют водоносные горизонты. Изучение гравитационных вод, их движения, физических свойств и химического состава является основной задачей при гидрогеологических исследованиях.

Вода в твердом состоянии. При температуре пород ниже нуля гравитационная и часть связанной воды замерзает и содержится в породах в виде кристаллов льда или ледяных прослоев и жил. Кристаллы льда цементируют отдельные минеральные частицы, превращая рыхлые породы в твердые. Свойства пород, сцементированных льдом, резко отличны от свойств талых пород. Изучением свойств мерзлых пород занимается особая наука — *мерзлотоведение* [29].

Вода в кристаллической решетке минералов. *Конституционная вода* входит в состав кристаллической решетки минералов в виде ионов H^+ и OH^-, участвуя в их строении, например $Ca(OH)_2$. При разрушении кристаллической решетки минералов выделяются водород и гидроксил, которые связываются и образуют молекулы воды. Выделение конституционной воды при нагревании у каждого минерала происходит в определенном температурном интервале (обычно выше 300° С) и сопровождается поглощением тепла. Это позволяет определять некоторые минералы при помощи метода термического анализа, для чего употребляются специальные приборы — *термографы*.

Кристаллизационная вода участвует в строении кристаллических решеток некоторых минералов в виде молекул воды в строго определенных количествах (например, гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Эта вода также выделяется из минералов при определенной температуре (ниже 300 и часто ниже 100° С) и сопровождается поглощением тепла, что и позволяет определять исследуемый минерал при помощи метода термического анализа. Выделение кристаллизационной воды обусловливает разрушение кристаллической решетки минерала и ее перестройку (например, гипс превращается в ангидрит).

Цеолитная вода — часть кристаллизационной воды, которая может выделяться и вновь поглощается без разрушения кристаллической решетки; входит в состав кристаллических решеток некоторых минералов — *цеолитов*, представляющих собой водные алюмосиликаты.

ГЛАВА IV

ВОДНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Под водными свойствами горных пород понимаются свойства, которые проявляются в них при взаимодействии с водой: водопроницаемость, влагоемкость, водоотдача, естественная влажность, набухание, размокание, усадка, липкость, пластичность, консистенция. Некоторые из этих свойств (набухание, размокание, усадка, липкость, пластичность и консистенция) характеризуют одновременно и физические свойства пород и поэтому будут рассмотрены в главе V.

§ 12. Водопроницаемость горных пород

Водопроницаемость — свойство пород пропускать воду, что обусловливается их пористостью или трещиноватостью. Не всякая порода способна пропускать воду. Глинистые породы, пористость которых почти всегда превосходит пористость песков и нередко равна 50—60% и более, практически не пропускают воду. Это обусловливается тем, что поры в глинистых породах очень мелкие, а находящаяся в этих породах вода является физически связанной, не подверженной силам гравитации. Вследствие этого глинистые породы являются практически водонепроницаемыми, или водоупорными, в отличие от песков, гравия, щебенки и других пород, свободно пропускающих воду и называемых водопроницаемыми. Водоупорными являются также монолитные невыветрелые скальные нетрещиноватые породы.

Водопроницаемость пород количественно характеризуется коэффициентом фильтрации (или водопроницаемости), представляющим собой скорость движения подземных вод при гидравлическом градиенте, равном единице; размерность его *см/сек*, *м/ч*, *м/сутки*.

Породы, непроницаемые сами по себе, в естественных условиях могут быть проницаемыми по трещинам, в том числе и глинистые; водопроницаемость глин может быть обусловлена также значительным гидравлическим градиентом (20—30). Методика определения коэффициента фильтрации изложена в главе XIV.

За последние годы большое распространение при гидрогеологических расчетах наряду с коэффициентом фильтрации получил коэффициент водопроводимости T:

$$T = k \cdot H, \tag{8}$$

где k — коэффициент фильтрации;

H — мощность водоносного горизонта.

Размерность коэффициента водопроводимости ($м^2/сутки$) выражает способность водоносного горизонта мощностью H *м* и шириной 1 *м* фильтровать через себя воду в единицу времени при напорном

градиенте, равном единице. Следовательно, коэффициент фильтрации и коэффициент водопроводимости определяют водопроницаемость горных пород и дают ее количественную характеристику.

§ 13. Влагоемкость пород

Влагоемкость — способность горных пород вмещать в своих пустотах и удерживать определенное количество воды при возможности свободного ее вытекания под действием силы тяжести. Различают следующие виды влагоемкости: полную — максимальное количество воды, удерживаемой породой при полном насыщении всех пустот водой; капиллярную — максимальное количество воды, удерживаемое в капиллярных порах; пленочную, или максимальную молекулярную, — максимальное количество физически связанной воды, удерживаемой частицами породы; гигроскопическую — соответствует количеству прочно связанной (адсорбированной) воды. Способы определения влагоемкости горных пород изложены в руководствах по методике лабораторных исследований свойств грунтов [53]. По степени влагоемкости горные породы разделяются на очень влагоемкие (торф, ил, глина, суглинки), слабо влагоемкие (мел, мергель, лёссовые породы, супеси, мелкозернистые пески) и невлагоемкие (скальные породы, галечники, гравий, крупнозернистые пески).

§ 14. Водоотдача пород

Водоотдача — свойство пород, насыщенных водой, свободно отдавать гравитационную воду. Количественно она характеризуется коэффициентом водоотдачи — отношением объема свободно вытекающей из породы воды (при полном заполнении пор или трещин) к объему всей породы, или удельной водоотдачей — количеством воды в литрах, вытекающей из 1 $м^3$ породы. Для крупнозернистых песков, гравия и т. п. пород коэффициент водоотдачи равен их пористости или полной влагоемкости. Водоотдача мелкозернистых песков, супесей и суглинков значительно меньше и равна разности между полной влагоемкостью и максимальной молекулярной влагоемкостью. Величина водоотдачи используется при решении вопросов осушения заболоченных территорий, дренирования выемок, определения притоков воды в котлованы и горные выработки и т. п.

§ 15. Прочие водные свойства горных пород

Влажность — содержание в породах в условиях естественного залегания воды, удаляемой высушиванием при температуре 105—107° С до постоянного веса образца породы. Выражается в процентах к весу абсолютно сухой твердой части образца. Определяется влажность по ГОСТу 5179—64. В зоне аэрации и капилляр-

ного насыщения влажность пород в течение года меняется в зависимости от сезонных изменений температуры, давления, влажности воздуха, осадков, испарения и других факторов.

Водопоглощение — способность пород поглощать воду; выражается отношением (в процентах) веса свободно поглощенной воды к весу сухой породы. Определяется взвешиванием породы, высушенной при температуре 105—107° С, а затем погруженной в воду при обычных температуре и давлении. При этих условиях вода не проникает в наиболее мелкие поры и тонкие трещины.

Водонасыщение — заполнение всех пор и трещин в породе (из которой предварительно удален воздух под вакуумом) водой, нагнетаемой под давлением до 150 *атм*. Количественно выражается отношением (в процентах) веса поглощенной воды к весу сухой породы. Отношение величины водопоглощения к величине водонасыщения называется коэффициентом водонасыщения.

ГЛАВА V

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

§ 16. Главнейшие процессы и факторы формирования физико-механических свойств горных пород

Физико-механические свойства горных пород рассматриваются в разделе инженерной геологии — грунтоведении. Горные породы и почвы, слагающие поверхностные зоны земной коры, в строительных целях используются в качестве оснований фундаментов различных сооружений как материал для возведения насыпей, дамб и других объектов, либо же как среда, в которой возводятся каналы, выемки, карьеры, тоннели и другие сооружения. Следовательно, под грунтами понимаются любые горные породы и почвы, рассматриваемые и используемые как объекты инженерно-строительной деятельности человека.

В дальнейшем термины «грунт» и «горная порода» используются нами как синонимы.

Основными задачами грунтоведения являются: изучение условий происхождения, залегания и вещественного состава грунтов (минерального, гранулометрического и химического); изучение их физических, механических и коллоидно-химических свойств; прогнозирование изменений свойств грунтов (в первую очередь их прочности) во времени в ходе строительства и эксплуатации сооружений; разработка методов искусственного улучшения свойств грунтов, поскольку их природные свойства не всегда удовлетворяют запросам различных видов строительства и тем самым не могут обеспечить устойчивость и долговечность возводимых сооружений. Грунтоведение опирается на широкий круг геологических (минералогию, петрографию,

динамическую и историческую геологию, геохимию и др.) и негеологических дисциплин (физику, коллоидную химию, строительную механику и др.), используя их основные положения.

Чтобы изучить грунты, надо объединить их большое разнообразие в группы, подгруппы и другие подразделения, характеризующиеся определенной общностью состава, свойств и других признаков, т. е. классифицировать их. Общепринятой инженерно-геологической классификации грунтов пока нет. В 1957 г. Совещание по инженерно-геологическим свойствам горых пород приняло классификацию, разработанную группой авторов. По этой классификации все горные породы и почвы подразделяются на два класса: породы с жесткими связями и породы без жестких связей.

Первые обладают прочными кристаллизационными связями между зернами составляющих их минералов. Это породы твердые, прочные, или как принято их называть в строительной практике, — скальные и полускальные. Под действием внешних нагрузок от сооружений они ведут себя как твердые упругие тела, практически не сжимаемые. Этот класс пород объединяет группы магматических, метаморфических и осадочных сцементированных горных пород.

Второй класс — породы без жестких связей — объединяет несколько групп пород и почв, которые характеризуются сложными по своей природе связями (мягкие, пластичные) или полным отсутствием связей между зернами (сыпучие). Этот класс пород и почв характеризуется большой изменчивостью своих свойств в зависимости от состава, степени влажности, плотности и нарушенности естественного сложения. Он объединяет группы осадочных несцементированных пород, почвы и искусственные грунты.

Наибольший практический интерес в инженерно-геологическом отношении представляют породы второго класса, являющиеся основным объектом изучения в грунтоведении.

Важной особенностью пород без жестких связей является то, что они состоят из твердых минеральных частиц и пор, которые заполнены поровым раствором и воздухом. Поровый раствор представляет собой воду, в которой всегда содержатся в диссоциированном виде различные соли (катионы и анионы). Следовательно, осадочные горные рыхлые породы состоят из твердой, жидкой и газообразной фаз, т. е. представляют собой в общем случае трехфазную систему. В данных природных условиях количество твердых частиц (твердой фазы) в грунтах является неизменным; соотношение же между воздухом и поровым раствором (а также количество и состав растворенных в поровой воде веществ) во времени может меняться, соответственно чему изменяются и свойства пород, особенно глинистых.

Одной из основных задач грунтоведения является предвидение возможных изменений свойств грунтов под влиянием естественных и искусственных факторов в их сложном взаимодействии между собой и во взаимодействии с возводимыми сооружениями и рекомендация профилактических мероприятий, осуществление которых предотвратит возможные деформации сооружений, проявление которых

может явиться следствием нарушения равновесного состояния грунтов.

Образование рыхлых обломочных осадочных пород начинается с седиментации терригенных материалов. Эти осадки, уплотняясь под воздействием веса вышележащих осадков, а также в результате протекающих в их толще сложных физико-химических процессов, постепенно из осадка превращаются в породу. Как известно, процесс превращения осадка в породу получил наименование диагенеза.

Диагенез проявляется в уплотнении осадка, изменении минерального состава (не во всех случаях) и структуры, что в конечном итоге и превращает его в породу. В последующем, после образования породы, в ней продолжаются различные эпигенетические процессы, изменяющие ее свойства. Граница между стадией диагенеза и эпигенеза чисто условная. Скорость процессов диагенеза весьма разнообразна; известны случаи, когда современные осадки подвергаются очень быстрому уплотнению (валунные глины и суглинки, некоторые известковистые отложения) и, наоборот, очень древние образования процессами диагенеза преобразованы очень мало (кембрийские синие глины окрестностей Ленинграда).

Наибольшее значение с инженерно-геологической точки зрения диагенетические процессы имеют в изменении плотности и упрочении осадков. Плотность раздельнозернистых грунтов — гравия, гальки, а отчасти и песков, характеризуемая их пористостью, под влиянием давления от вышележащих толщ практически не увеличивается. Существенное влияние на плотность и прочность раздельнозернистых осадков оказывает циркулирующая по их порам вода, включающая растворенные соли, глинистые и органоминеральные коллоидные вещества. Из циркулирующих растворов выпадают гипс, углекислая известь, гидраты окислов железа, кремнекислота, осаждаются глинистые частицы и другие вещества, которые заполняют поры раздельнозернистых осадков. Выпадение этих образований в порах влечет за собой увеличение плотности песчаных и крупнообломочных пород, одновременно происходит их цементация; пески превращаются в песчаники, галечники — в конгломераты. Прочность образующихся при этом пород определяется прочностью природного цемента; наиболее прочными являются породы, скрепленные кремнекислотой, менее прочными — глинистым цементом.

Диагенез глинистых осадков носит отличный от раздельнозернистых пород характер и в существенной мере зависит от состава осадков и среды. Вообще уплотнение и упрочение глинистых осадков нельзя рассматривать только как простой механический процесс. В глинистых осадках с первого момента их образования протекают сложные диагенетические процессы, обусловленные взаимодействием различных факторов — механического уплотнения, химических, физико-химических и биохимических процессов, в совокупности обусловливающих литификацию осадка и превращение его в породу.

Эти процессы изменяют первоначальный состав осадка и приводят к появлению новых образований. В результате проявления диагенетических процессов прочность глинистых пород увеличивается.

При инженерно-геологической оценке изучаемых участков существенное значение имеют условия залегания горных пород (форма залегания, мощность и протяженность пластов, соотношение пород друг с другом, тектоническая нарушенность и т. п.).

При строительстве дорожных выемок, отрывке котлованов, разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом и т. п. залегание пород в откосах может быть таким, как показано на рис. 6.

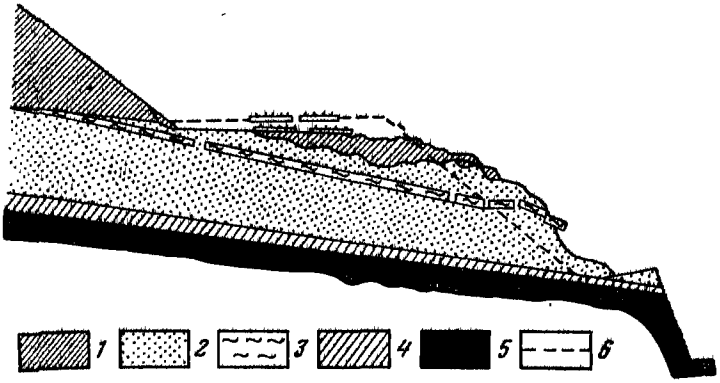


Рис. 6. Геологический разрез участка оползня на Байдаковском углеразрезе

1 — суглинки; *2* — песок; *3* — каолин; *4* — глина серая; *5* — уголь бурый; *6* — положение рабочего уступа до оползня

Наличие в песках, слагающих вскрышной уступ на Байдаковском углеразрезе, прослоя каолинов явилось причиной крупного оползня, в результате чего горизонтальная площадка вскрышного уступа, по которой происходило передвижение транспортно-отвального моста и других тяжелых механизмов, на протяжении 52 *м* сместилась вниз по прослою каолина.

Благоприятными условиями для строительства наземных объектов следует считать такие, когда в основании сооружений залегают однородные выдержанные по площади и мощности породы: песчаники, сланцы, аргиллиты, крупные интрузивные тела. Менее благоприятными следует считать частое чередование в основании сооружений пород различного литологического состава, физико-механические свойства которых неодинаковы: линзовидное залегание аллювиальных и ледниковых отложений, чередование песчаников, известняков и сланцев, наличие в изверженных породах жил, даек и небольших куполов. Сильная тектоническая нарушенность, особенно трещиноватость, имеет отрицательное значение при строительстве гидротехнических и подземных объектов.

При инженерно-геологической оценке горных пород нужно обязательно учитывать также текстурные и структурные их особенности.

Под текстурой в инженерной геологии понимается совокупность признаков, характеризующих неоднородность породы в пласте; обычно определяется расположением и соотношением механических (гранулометрический состав), минералогических и структурных элементов в пласте данной породы. Текстура обусловливает анизотропность свойств породы в разных направлениях. Различают следующие виды текстур: слоистую, сланцеватую, плитчатую, листоватую, микрослоистую, косо- и диагональнослоистую, линзовидную, бутовую, гнездовую, оолитовую и др. Текстура пород создается при их образовании (слоистые, листоватые, линзовидные, косо-и диагональнослоистые и др.) либо в процессе диагенеза (плитчатая, сланцеватая, оолитовая и др.). Наибольшее значение текстура имеет при инженерно-геологической оценке осадочных пород, так как текстурные особенности этих пород могут обусловить явления оползания откосов искусственных выработок (выемок, карьеров и т. п.), неравномерную сжимаемость пород в основании сооружений, проявление механической суффозии и другие нежелательные процессы, отрицательно влияющие на сооружения.

Под структурой горных пород в инженерной геологии понимают их строение, определяемое следующими признаками: размером, формой и характером поверхности слагающих породу частиц или их агрегатов; относительным расположением и взаимоотношением их в породах; характером связей между частицами породы, оказывающими сопротивление при механическом воздействии на нее; последние называются внутренними структурными связями.

В разных породах структурные связи имеют различный характер, что обусловливает и различные их механические свойства.

По П. А. Ребиндеру, структурные связи в горных породах подразделяются на коагуляционные, конденсационные и кристаллизационные.

Коагуляционные структурые связи между минеральными частицами, слагающими осадочные породы, возникают при осаждении в водоемах терригенного материала. Тонкодисперсные и коллоидные частицы, около которых имеются толстые пленки физически связанной воды, испытывая броуновское движение, соударяются. При соударении частиц происходит прорыв водных пленок, обычно по углам и ребрам, между частицами в местах контактов проявляются силы межмолекулярного взаимодействия (силы вандерваальса) и частицы слипаются, коагулируют, что убыстряет процесс осаждения. Как правило, в процессе коагуляции образуются агрегаты из многих слившихся минеральных частиц различного размера (рис. 7). В результате на дне водоемов образуется очень рыхлый структурный каркас из агрегатов первого, второго и более высоких порядков. В порах структурного каркаса удерживается значительное количество так называемой иммобилизованной воды. Хотя при соударении в местах контактирования

частиц и происходит прорыв пленки физически связанной воды, тонкие водные прослоечки остаются; они, играя роль «смазки», снижают проявление сил межмолекулярного взаимодействия, а тем самым и прочность связей между частицами.

Коагуляционные структуры характеризуются низкой прочностью и выраженной пластичностью (см. § 17). Эти свойства коагуляционных структур объясняются наличием между слипшимися минеральными частицами тончайших «смазочных» водных прослоечков. По мере увеличения гравитационного давления, обусловливаемого весом вновь осаждающихся терригенных осадков, и геохимических процессов, сопровождающихся дегидратацией осадка, число контактов между частицами и их агрегатами в единице объема увеличивается, водные прослоечки в местах контактов утончаются, силы межмолекулярного взаимодействия при этом возрастают, прочность коагуляционных связей увеличивается и тем самым прочность горных пород с течением времени также возрастает. Тем не менее прочность пород при наличии только коагуляционных структурных связей невелика (от долей до нескольких килограммов на 1 $см^2$). Связи эти обычно легко разрушаются под воздействием воды.

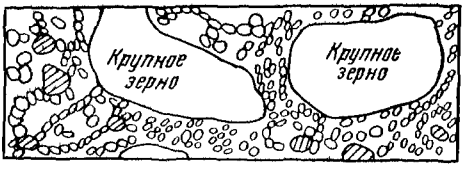


Рис. 7. Схема агрегатной структуры глинистого грунта

Коагуляционные структурные связи обычно присущи молодым глинистым породам; в более древних глинистых породах наряду с первичными коагуляционными связями возникают более прочные структурные связи иного порядка.

К о н д е н с а ц и о н н ы е структурные связи возникают в обломочных осадочных горных породах в процессе их диагенеза. Факторами, обусловливающими образование этого типа структурных связей, являются: кристаллизующиеся из порового раствора (по мере уменьшения его объема или содержащихся в нем газов) различные химические вещества, играющие роль цемента между минеральными частицами; перекристаллизация коллоидных глинистых минералов в процессе их старения; биогенное осаждение кальцита, арагонита, гидратов окислов железа, алюминия и других веществ, цементирующих минеральные частицы; цементация минеральных частичек пленками коллоидов, преимущественно гелем кремнекислоты, гидратами окислов железа и т. п., адсорбирующихся на поверхности более крупных частиц грунта, осаждающихся вместе с ними и кристаллизующихся с течением времени; склеивающее действие различных органо-минеральных соединений, всегда имеющихся в терригенных осадках и с течением времени твердеющих.

Структурные связи рассматриваемого типа могут быть водостойкими (цементирующее действие отвердевших коллоидов кремнезема, гидроокислов железа, алюминия и др.) и водонестойкими (цементация за счет гипса, карбонатов и других растворимых солей).

Поскольку этот тип структурных связей обусловливает цементацию рыхлых терригенных осадков, то иначе конденсационные связи называются цементационными. Прочность цементационных связей бывает самой различной, достигая в некоторых породах сотен и тысяч килограммов на квадратный сантиметр. Цементационные структурные связи присущи алевролитам, аргиллитам, песчаникам, мергелям, конгломератам, брекчиям и другим уплотненным обломочным горным породам, которые относятся к скальным породам.

Кристаллизационные структурные связи в разных породах имеют различную природу. В изверженных породах они возникают по мере охлаждения магмы и выкристаллизации из нее минералов. Кристаллическая решетка минералов представляет собой совокупность чередующихся положительных и отрицательных ионов, расположенных в узлах кристаллической решетки; связь между ними химическая. Связи же между отдельными минералами, слагающими изверженную породу, очень сложные и полностью не изучены. В целом структурные связи в изверженных и некоторых метаморфических породах (гнейсах, кремнистых песчаниках и др.) очень жесткие, породы водоустойчивы, в невыветрелом состоянии временное сопротивление сжатию у них обычно превышает 1000 *кГ/см*^{2}.

Кристаллизационные связи в хемогенных породах возникают при осаждении из водных пересыщенных растворов солей, отдельные кристаллы которых при этом срастаются друг с другом.

Кристаллизационные структурные связи, являясь весьма прочными, при разрушении не восстанавливаются, они хрупкие.

Н. Я. Денисов коагуляционные структурные связи назвал первичным сцеплением, а конденсационные (цементационные) — сцеплением упрочнения. Это подразделение видов связей широко укоренилось в литературе и строительной практике.

§ 17. Показатели физико-механических свойств пород

Строительные свойства грунтов определяются совокупностью их состава, физических и механических свойств. Это и обусловливает необходимость изучения физических свойств грунтов при проектировании и строительстве тех или иных объектов. Многие физические и механические свойства грунтов во времени являются переменными, изменяясь под влиянием природных и искусственных факторов, что и обусловливает необходимость изучать свойства грунтов в их взаимодействии с внешней средой. Для классификации грунтов и для оценки их поведения во взаимодействии с сооружением необходимо иметь количественные (цифровые) характеристики, или показатели, их свойств, которые получаются путем изучения грунтов лабораторными методами, подробно изложенными в специальных руководствах [53]. Большинство показателей определяется на образцах грунтов в их естественном состоянии, так называемых монолитах (при их естественной структуре, пористости и влажности).

Гранулометрический состав

Под гранулометрическим, или (реже) механическим, составом понимают процентное содержание частиц различного размера, слагающих данную рыхлую породу. Размер частиц изменяется в широких пределах: от сотен и десятков сантиметров в крупнообломочных раздельнозернистых породах до сотых и тысячных долей миллиметра (и меньше) у глинистых пород. Группы частиц более или менее одинакового размера называются ф р а к ц и я м и.

В зависимости от процентного соотношения различных фракций крупнообломочные и песчаные раздельнозернистые сыпучие породы при строительстве дорог, гражданских и промышленных зданий и других сооружений по действующим СНиПам классифицируются согласно табл. 4.

Таблица 4

Классификация грунтов по гранулометрическому составу

Наименование видов крупнообломочных и песчаных грунтов	Распределение частиц по крупности в % от веса сухого грунта
Щебеночный (при преобладании окатанных частиц — галечниковый)	Вес частиц крупнее 10 *мм* составляет более 50%
Дресвяный (при преобладании окатанных частиц — гравийный)	Вес частиц крупнее 2 *мм* составляет более 50%
П е с ч а н ы й	
Песок гравелистый	Вес частиц крупнее 2 *мм* составляет более 25%
» крупный	Вес частиц крупнее 0,5 *мм* составляет более 50%
» средней крупности	Вес частиц крупнее 0,25 *мм* составляет 50%
» мелкий	Вес частиц крупнее 0,1 *мм* составляет более 75%
» пылеватый	Вес частиц крупнее 0,1 *мм* составляет менее 75%

Знание гранулометрического состава грунтов совершенно необходимо для решения целого ряда практических задач: для классификации изучаемых пород, для ориентировочного определения степени их водопроницаемости, для установления возможности их вымыва в откосах выемок и насыпей, для расчета гравийных фильтров, оценки грунтов для отсыпки насыпей, балластного слоя, приготовления бетона и в других случаях. Определяется гранулометрический состав по ГОСТу 12536—67.

Результаты гранулометрического анализа для наглядности изображаются графически в виде циклограмм, треугольников, а чаще всего в виде суммарных кривых в полулогарифмическом масштабе

(рис. 8). Кривая гранулометрического состава позволяет определить коэффициент неоднородности по соотношению:

$$K_н = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \qquad (9)$$

где d_{60} и d_{10} — диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится (соответственно) 60 и 10% частиц по весу; определяются проведением на графике от точки на ординате, соответствующей 60 и 10%, линии параллельно оси абсцисс до пересечения с кривой гранулометрического состава и от точки пересечения опускают перпендикуляр на ось абсцисс; точки на оси абсцисс и будут искомыми диаметрами.

При степени неоднородности песчаного грунта $K_н > 3$ к наименованию песков гравелистых, крупных и средней крупности добавляют наименование неоднородный песок.

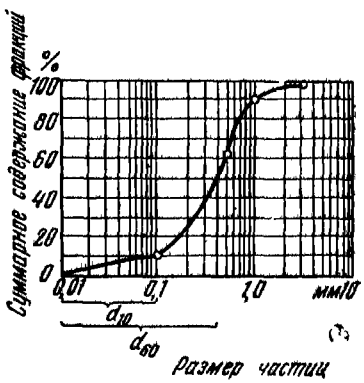


Рис. 8. Суммарная кривая гранулометрического состава в полулогарифмическом масштабе

Удельный вес

Удельным весом $\gamma_г$ грунтов называют вес единицы объема минеральных частиц (твердой фазы), определяемый как отношение веса частиц к их объему; выражается в $Г/см^3$. Удельный вес минералов, входящих в состав рыхлых пород, изменяется в незначительных пределах; в среднем для песков он составляет 2,65 (удельный вес кварца), для суглинков 2,70 и для глин 2,75. Породы, обогащенные органическими веществами, имеют меньший удельный вес. Величина удельного веса используется для определения некоторых физических и механических показателей и тем самым он является косвенной характеристикой. Определяется удельный вес по ГОСТу 5181—64.

Объемный вес

Объемный вес грунта γ_0 — вес единицы объема грунта при естественной пористости и влажности; выражается в $Г/см^3$ или $Т/м^3$. Поскольку грунтам присуща пористость, то объемный вес всегда меньше удельного веса. Величина объемного веса зависит от пористости и степени увлажнения породы; максимальный объемный вес ее при данной пористости будет при полном заполнении пор водой. Объемный вес породы является прямым расчетным показателем и используется для расчета давления грунта на подпорные стенки; расчета устойчивости откосов выемок, котлованов, карьеров и т. п.; определения величины горного давления в тоннелях; для вычисления объемного веса скелета грунта и пористости (в последнем случае

объемный вес является косвенным показателем). Определяется объемный вес на монолитах чаще способом парафинирования. Грунты, встречаемые в строительной практике, обычно имеют объемный вес от 1,5 до 2,21 *Г/см*³. Определяется объемный вес по ГОСТу 5182—64.

Объемный вес скелета грунта (иначе объемный вес твердой фазы) γ_c — вес единицы объема грунта при естественной пористости, но без веса поровой воды. Объемный вес скелета грунта характеризует плотность породы; чем больше объемный вес, тем больше в единице объема грунта твердых частиц, тем более плотно сложена порода. Непосредственное определение объемного веса твердой фазы невозможно, так как при удалении воды из пор путем высушивания объем образца уменьшается, естественная пористость грунта при этом изменяется. Поэтому объемный вес скелета грунта определяется по формуле:

$$\gamma_c = \frac{\gamma_0}{1+0{,}01W}, \qquad (10)$$

где W — естественная влажность грунта.

Значение объемного веса скелета грунта изменяется в пределах от 1 до 1,9 *Г/см*³ и более.

Если породы залегают ниже уровня подземных вод, то в результате взвешивающего давления воды объемный вес породы уменьшается; определяется объемный вес пород, находящихся под водой, по формуле:

$$_{взв} = \frac{\gamma_c(\gamma_г - 1)}{\gamma_г}. \qquad (11)$$

Естественная влажность

Естественная влажность W — количество воды в порах грунта в естественных условиях; представляет собой отношение веса воды к весу минеральных частиц в данном объеме грунта в процентах и определяется по ГОСТу 5179—64. Влажность грунтов изменяется в широких пределах; от нескольких (в песках) до многих сотен процентов (в илах). Влажность, соответствующая полному заполнению всех пор грунта водой, называется полной влагоемкостью и определяется по формуле:

$$W_{пв} = \frac{100\varepsilon}{\gamma_г} \text{ или } W_{пв} = \frac{n}{\gamma_г}, \qquad (12)$$

где ε — коэффициент пористости;

n — пористость.

В естественных условиях естественная влажность не всегда соответствует полной влагоемкости. В подобных случаях характеристикой степени заполнения пор водой служит степень влажности грунта (или коэффициент влажности) — отношение объема пор, заполненных водой, к общему объему пор в данном объеме грунта. Определяется по формуле:

$$G = \frac{W \cdot \gamma_г}{100 \cdot \varepsilon} \text{ или } G = \frac{W}{W_{пв}}, \text{ или } G = \frac{W\gamma_г(1-n)}{n}. \qquad (13)$$

Из физического определения степени влажности следует, что этот показатель может изменяться в пределах от нуля (абсолютно сухие грунты) до 1 (все поры в грунте заполнены водой).

По величине G песчаные и глинистые грунты подразделяются на маловлажные ($G < 0{,}5$), очень влажные ($0{,}5 < G < 0{,}80$) и насыщенные водой ($0{,}8 < G \leqslant 1$). Степень влажности является важной характеристикой песчаных грунтов, так как поведение песков в основании сооружений определяется не абсолютной их влажностью, а относительной. По действующим СНиПам нормативные давления на песчаные грунты основания изменяются от 3 *кГ/см*^{2} (пески мелкие маловлажные) до 1 *кГ/см*^{2} (пески пылеватые, насыщенные водой).

Пористость

Пористость n — отношение объема пор ко всему объему грунта, выраженное в процентах. Коэффициент пористости ε — отношение объема пор к объему скелета (объему твердой фазы) грунта. Пористость и коэффициент пористости являются очень важными показателями свойств грунтов, характеризуя их плотность, что *при оценке грунтов как оснований сооружений имеет существенное* значение. В зависимости от значения коэффициента пористости по табл. 13а, 13б и 13в СНиП II-Б.1—62 устанавливаются нормативные и расчетные характеристики песчаных и глинистых грунтов (для последних с учетом также числа пластичности и консистенции).

Пористость грунтов определяется расчетом, так как лабораторные методы непригодны в связи с тем, что при заполнении пор водой породы набухают, тем самым их пористость возрастает и уже не будет соответствовать естественной пористости грунтов. Пористость определяется по формулам:

$$n = \frac{\gamma_г - \gamma_с}{\gamma_г} \cdot 100\% \text{ или } n = \left[1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_г (1 + 0{,}01W)}\right] \cdot 100. \qquad (14)$$

Коэффициент пористости вычисляется по формулам:

$$\varepsilon = \frac{\gamma_г - \gamma_с}{\gamma_с} \text{ или } \varepsilon = \frac{n}{100 - n}. \qquad (15)$$

Поскольку плотность грунтов, характеризуемая пористостью, является важной их строительной характеристикой, то в последние годы предложены методы, позволяющие определять пористость грунтов в их естественном состоянии с помощью радиоактивных изотопов и пенетрацией (см. главу 17).

Пластичность

Пластичность грунтов — способность глинистых пород изменять свою форму (деформироваться) под действием внешних сил без разрыва сплошности и сохранять полученную при деформации новую форму после прекращения действия внешних сил. Пластичные

свойства глинистых грунтов зависят от влажности, степени дисперсности, минерального состава, состава катионов диффузного слоя (обменных катионов), концентрации порового раствора, состава катионов раствора и других факторов. Глинистые породы становятся пластичными только при некотором строго определенном содержании воды. В инженерно-геологической практике пластичность глинистых пород характеризуется так называемыми пределами пластичности.

Нижний предел пластичности, или предел раскатывания в проволоку, $W_р$ — влажность в процентах, при которой глина раскатывается в жгутики диаметром 3 *мм*; при этой влажности глинистая порода из твердого состояния переходит в пластичное. Определяется по ГОСТу 5183—64.

Верхний предел пластичности, или граница текучести, $W_т$ — влажность в процентах, при которой глинистые грунты из пластичного состояния переходят в текучее. Определяется по величине вдавливания под действием собственного веса стандартного конуса весом 76 *г* и высотой 25 *мм* при угле заострения 30°; искомая влажность считается равной $W_т$ при погружении конуса в грунтовое тесто на глубину 10 *мм*. Определяется по ГОСТу 5184—64.

Число пластичности, или индекс пластичности, $W_п$ — разность между влажностью верхнего и нижнего пределов пластичности:

$$W_п = W_т - W_р. \qquad (16)$$

Число пластичности является классификационным показателем. По действующим СНиПам глинистые грунты в зависимости от числа пластичности подразделяются на несколько видов (табл. 5).

Таблица 5

Классификация грунтов по числу пластичности

Виды глинистых грунтов	Число пластичности
Супесь	$1 < W_п < 7$
Суглинок	$7 < W_п < 17$
Глина	$W_п > 17$

Консистенция

Из характеристики пределов пластичности следует, что состояние глинистых пород, а тем самым и их строительные свойства меняются в зависимости от степени увлажнения. Так, сухая глина при увлажнении из состояния твердого тела переходит сначала в пластичное, а затем в текучее. Такое изменение состояния глин при увлажнении называется изменением их консистенции. Под консистенцией понимается степень подвижности частиц грунта или сопро-

тивляемость его внешним механическим воздействиям при различной влажности. Количественно консистенция характеризуется показателем консистенции B, который определяется по формуле

$$B = \frac{W - W_p}{W_n}. \qquad (17)$$

По СНиП II—Б.1—62 глинистые грунты по величине показателя консистенции именуются согласно табл. 6.

Таблица 6

Классификация глинистых грунтов по консистенции

Грунты	Показатель консистенции
Супеси	
Твердые	$B < 0$
Пластичные	$0 \leqslant B \leqslant 1$
Текучие	$B > 1$
Суглинки и глины	
Твердые	$B < 1$
Полутвердые	$0 \leqslant B \leqslant 0{,}25$
Тугопластичные	$0{,}25 \leqslant B \leqslant 0{,}5$
Мягкопластичные	$0{,}5 < B < 0{,}75$
Текучепластичные	$0{,}75 < B \leqslant 1$
Текучие	$B > 1$

По значениям коэффициента пористости, нижнего предела пластичности и показателя консистенции по табл. 13б и 13в указанного СНиПа для глинистых грунтов устанавливаются соответствующие расчетные характеристики.

Определенная указанным способом консистенция не отражает естественного состояния глинистых пород, так как значения пределов пластичности определяются на образцах нарушенной структуры. В строительной практике известно много случаев, когда глинистые породы в естественном состоянии по показателю консистенции должны быть текучими, т. е. их свойства должны быть равны нулю. В действительности же при испытаниях опытными штампами (см. ниже) их несущие свойства равнялись нескольким килограммам на квадратный сантиметр. Это обусловливалось наличием в подобных грунтах водостойких цементационных структурных связей, которые разрушаются при определении пределов пластичности.

Поэтому более точно консистенцию глинистых пород следует определять в их природном состоянии. В настоящее время отсутствуют стандартные методы определения природной консистенции, но они разрабатываются. Наиболее перспективным является метод пенетрации, т. е. путем определения глубины погружения конуса стандартной конструкции (еще не установленной) можно будет получать количественную характеристику консистенции грунтов естественного сложения.

Липкость

Липкость (клейкость, прилипаемость) — способность грунтов при определенном содержании воды прилипать к рабочим органам землеройных механизмов. Проявляется липкость при влажности выше нижнего предела пластичности. Количественной характеристикой липкости грунтов является максимальное усилие в граммах на квадратный сантиметр, необходимое для отрыва металлической пластинки от грунта при различной его влажности, что определяется в лабораторных условиях. Определение липкости имеет существенное значение при строительстве дорог, аэродромов и других объектов.

Набухание и усадка

Глинистые породы при увлажнении увеличиваются в объеме, н а б у х а ю т, а при уменьшении влажности происходит уменьшение их объема — у с а д к а. Причиной набухания является увеличение толщины гидратных оболочек физически связанной воды. Объем минеральных частичек в набухающем грунте остается неизменным, а увеличение объема обусловливается увеличением пор, полностью заполняемых водой; тем самым влажность набухающих грунтов возрастает. Поскольку утолщающиеся около минеральных частичек гидратные оболочки снижают силы сцепления между частицами, то прочность набухающих грунтов значительно уменьшается. Усадка обусловливается процессами, обратными набуханию. Утоняющиеся при уменьшении влажности гидратные оболочки не препятствуют проявлению сил сцепления между твердой фазой грунта, при этом происходит сближение частиц и объем грунта сокращается.

Набухание в глинистых породах возможно только при наличии коагуляционных структурных связей или же легко разрушаемых водонестойких цементационных связей. Если же цементационные структуры связи являются водоустойчивыми, то набухание грунтов возможно только при механическом разрушении этих связей. Отсюда и вытекает общее требование, соблюдение которого является строго обязательным: при вскрытии котлованов для закладки фундаментов и в других подобных случаях работу вскрышных механизмов по мере приближения к проектным отметкам надо организовать так, чтобы в наибольшей степени сохранить присущие глинистым породам естественные структурные связи, а тем самым и их природную прочность.

Для верхней части толщ глинистых пород характерны периодические изменения влажности, связанные с влиянием метеорологических факторов, что сопровождается изменением их объема — набуханием при увлажнении и усадкой при высыхании. Такие изменения объема глинистых пород приводят к уменьшению коагуляционных и цементационных структурных связей, породы разрушаются и если это происходит на откосах выемок, котлованов, каналов и т. п. сооружений, то откосы деформируются (если не будут приняты профилакти-

ческие меры). Явления набухания и усадки глинистых пород, служащих основанием сооружений, могут обусловить деформации последних, так как при соответствующих условиях (при наличии тяжелых натрий-монтмориллонитовых глин и при поступлении в них маломинерализованной воды) давление набухания может достигать 3 $кГ/см^2$ и больше и может превысить давление, передаваемое на грунты основания сооружением, следствием чего явится неравномерное набухание пород основания. Усадка также является неравномерной, что в совокупности с процессами набухания и влечет за собой дополнительные неравномерные осадки сооружений (полотна дорог, кирпичных зданий и т. п.); это иллюстрируется рис. 9.

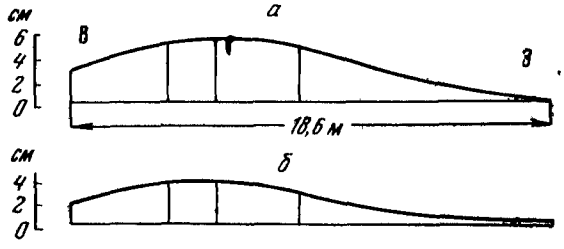


Рис. 9. Изменение высоты подъема фундаментов северной (*а*) и южной (*б*) стен здания в результате набухания глин

К набухающим грунтам по СНиП II—Б.1—62 относятся глинистые грунты, для которых значение

$$\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_т}{\varepsilon + 1} < -0{,}4,$$

где ε_0 — коэффициент пористости грунта природного сложения и влажности;

$\varepsilon_т$ — коэффициент пористости на границе текучести.

Проектирование и строительство сооружений на набухающих грунтах осуществляется в соответствии с «Временными указаниями по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на набухающих грунтах» СН 331—65 (М., Стройиздат, 1966); в этих указаниях изложены и методы определения характеристик набухающих грунтов.

Размокаемость

Под размокаемостью понимается способность глинистых грунтов при впитывании воды терять связность и превращаться в рыхлую бесформенную массу с полной потерей несущей способности. Основное значение в размокании имеет образование около минеральных грунтовых частичек предельно толстых гидратных оболочек, полностью устраняющих внутренние структурные связи — коагуляционные и нестойкие цементационные. Нарушение естественного сложения пород значительно способствует размоканию. Интенсивность размокания образцов глинистых пород в воде зависит от ряда факторов: их состава, начальной влажности, наличия цементационных

связей и их водостойкости, степени выветрелости, нарушенности естественной структуры искусственными факторами. Степень размокаемости грунтов используется при оценке явлений переработки берегов водохранилищ, устойчивости откосов каналов, стенок котлованов и других земляных сооружений. Определение скорости размокания грунтов представляет собой испытание грунтов на устойчивость под водой.

Показателями размокания являются: время, в течение которого образец грунта, помещенный в воду, распадается; характер распада (крупные или мелкие комочки, пыль и т. п.). Определение размокаемости проводится на образцах ненарушенной и нарушенной структуры в зависимости от того, в каком состоянии грунт будет взаимодействовать с водой. Для определения размокаемости используется ряд приборов, методика работы с которыми изложена в специальных руководствах [53].

Растворимость

Некоторые породы (известняки, доломиты, гипс, соли и т. п.) при соприкосновении с подземной водой могут полностью или частично растворяться ею. Растворяющей способностью подземная вода обладает только в том случае, если она не насыщена соответствующей солью. Например, подземные воды, насыщенные карбонатом кальция, не будут растворять известняки, насыщенные сульфатом кальция, не растворяют гипс и ангидрит и т. п. Растворяющая способность агрессивных подземных вод зависит также от скорости их движения в породе; чем больше скорость движения воды, тем при прочих равных условиях выше ее растворяющая способность. Практически с растворением пород приходится встречаться при строительстве плотин и каналов, в основании и в бортах которых могут залегать легкорастворимые породы. В зависимости от скорости процессов растворения свойства этих пород, особенно их водопроницаемость и прочность, существенно меняются, что может сказаться отрицательно на сооружении. Методика определения скорости растворения различных пород в зависимости от влияния всевозможных факторов удовлетворительно еще не разработана.

Размягчаемость

У некоторых пород под действием воды наблюдается снижение прочности без видимых признаков их разрушения. Это снижение прочности называется размягчаемостью и характеризуется коэффициентом размягчаемости η, представляющим собой отношение временного сопротивления породы сжатию после насыщения водой (P_2) к временному сопротивлению породы сжатию до насыщения (P_1):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \qquad (18)$$

Размягчаемость зависит отчасти от пористости пород и минерального состава, а главным же образом от прочности связей между части-

цами, слагающими породу. Малый коэффициент размягчаемости свойствен породам, содержащим много глинистых минералов — мергелям, глинистым сланцам и т. п., а также породам, сцементированным глинистым, карбонатным и гипсовым цементом. Способность пород к размягчаемости имеет существенное значение при их оценке для использования в качестве естественных строительных материалов; хорошими считаются породы с коэффициентом размягчаемости не менее 0,75.

Морозоустойчивость

Морозоустойчивость пород — способность влажной горной породы противостоять разрушающему действию замерзающей в порах и трещинах воды. Напряжения, возникающие при этом в породе, могут достигать 2000 *кГ/см*^{2}. Морозоустойчивость зависит от прочности пород, величины и характера пористости и трещиноватости, от степени насыщения пор водой и от скорости промерзания. Морозоустойчивость пород определяется путем попеременного замораживания образцов в холодильной камере, оттаивания в воде комнатной температуры и определения временного сопротивления сжатию до и после промораживания. Испытания проводятся при температуре в холодильной камере от —15 до —40° С; число циклов испытаний изменяется от 25 до 200 и выше в зависимости от типа и важности сооружений, для которых намечается использовать породу. Степень морозоустойчивости оценивается числом циклов испытаний, выдержанных горной породой без заметных признаков разрушения, и потерей прочности от замораживания.

Механические свойства

Сопротивление пород сжатию. Степень сжатия и уплотнения пород и явления, происходящие при этом в них, зависят от вида и структурных особенностей грунтов. Сжатие раздельнозернистых грунтов (песков, гравия, щебенки и т. п.) зависит от степени их плотности, гранулометрического состава и характера внешнего воздействия. При статическом давлении, обусловленном весом сооружений или вышележащей толщи грунтов, уплотнение раздельнозернистых грунтов будет обусловливаться перемещением отдельных зерен относительно друг друга (чему препятствует трение, возникающее на поверхности перемещающихся зерен), что протекает сравнительно быстро и почти независимо от влажности и при тех давлениях, которые практически передаются на грунты от веса возводимых сооружений, сжатие рассматриваемых грунтов является сравнительно незначительным. Сопротивление взаимному перемещению минеральных частичек в раздельнозернистых грунтах оказывают преимущественно силы трения, проявляющиеся по поверхности скольжения.

Если же на подобные грунты будут воздействовать динамические, знакопеременные нагрузки, то в зависимости в основном от степени их плотности, а также влажности, гранулометрического, минерального

состава и характера динамического воздействия уплотнение их может быть значительным, что и необходимо заранее предугадывать.

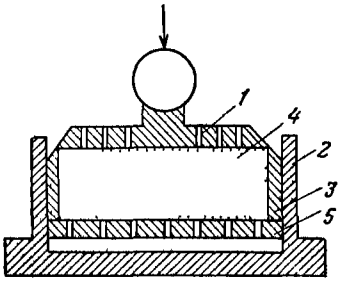


Рис. 10. Схема компрессионного прибора

1 — верхний пористый поршень; *2* — корпус прибора; *3* — кольцо; *4* — образец грунта; *5* — нижний пористый поршень

Сжимаемость связных, или глинистых, пород, занимающих преобладающее положение среди рыхлых грунтов, зависит от сочетания и взаимовлияния многих факторов: степени их дисперсности (гранулометрического состава), минерального состава, степени увлажнения, консистенции грунта, характера структурных связей (коагуляционные или конденсационные), характера и скорости приложения нагрузок и др.

Количественно влияние всех указанных факторов в их совокупности на степень сжатия глинистых пород точно еще не установлено.

Сопротивление сжатию рыхлых пород в лабораториях определяется либо в приборах с жесткими стенками — одометрах (рис. 10), что исключает возможность бокового расширения образца грунта,

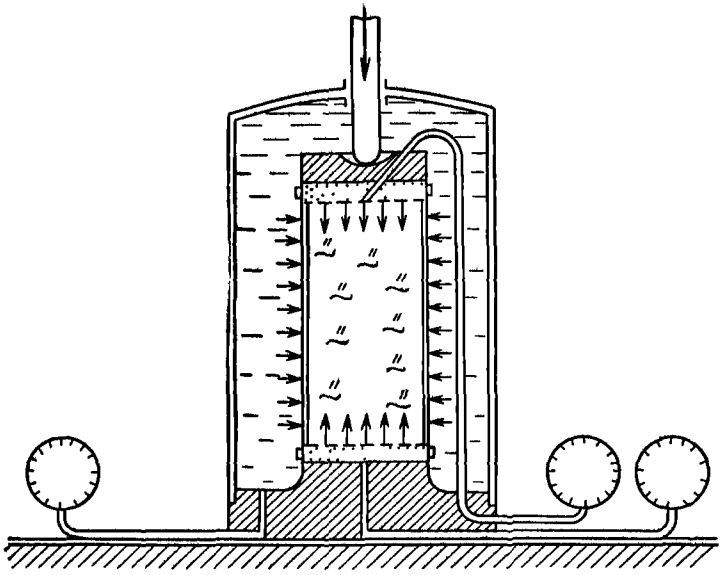


Рис. 11. Схема стабилометра

либо в приборах в условиях трехосного сжатия — с т а б и л о м е т р а х (рис. 11), в которых испытания свойств грунтов более правильно моделируют напряженное состояние грунтов в основании

сооружений. В одометрах можно определить только коэффициент уплотнения, модуль общей деформации и коэффициент фильтрации. Испытания же в стабилометрах позволяют комплексно определять показатели механических свойств несвязных и связных грунтов: коэффициент уплотнения, модуль деформации, коэффициент бокового давления, коэффициент поперечного расширения (Пуассона), коэффициент внутреннего трения, сцепление и коэффициент фильтрации при заданном давлении.

Одометры иначе именуются компрессионными приборами. В этих приборах образец грунта помещается в жесткую метал-

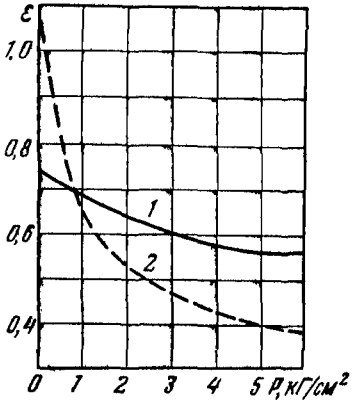


Рис. 12. Компрессионные кривые для образцов

1 — естественной структуры; *2* — нарушенной структуры

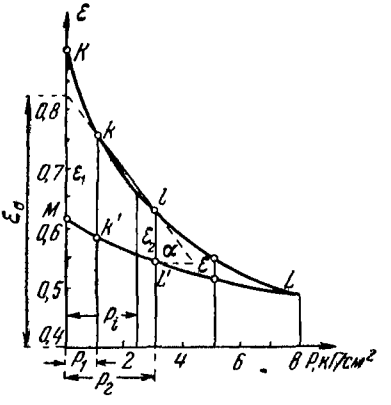


Рис. 13. Схема определения коэффициента уплотнения

K—L — кривая сжатия; *M—L* — кривая разуплотнения; ε_0 — коэффициент пористости в естественном состоянии; ε_1, ε_2 — коэффициенты пористости при давлении P_1 и P_2, *k — l* — отрезок кривой, условно принимаемый за прямую; α — угол наклона прямой *k—l*

лическую обойму. Сверху и снизу образец прикрыт пористыми пластинками, свободно пропускающими воду, отжимаемую из грунта при его сжатии. При испытаниях водонасыщенных грунтов одометр погружают в сосуд с водой, а при не полностью водонасыщенных — испытания проводят без погружения в воду. Давление на образец передается с помощью рычажного приспособления, на который устанавливается груз. Уплотнение фиксируется при помощи специального индикатора — мессуры, регистрирующего изменение высоты образца, что связано с уменьшением пористости грунта.

Многочисленными опытами установлено, что каждому приданному на данную породу давлению соответствует определенная пористость, а при полном насыщении пор водой — и влажность. В настоящее время во всех лабораториях нашей страны принято деформацию образца в компрессионных приборах выражать в изменении их пористости при изменении давления. Связь между изменением пористости и давлением выражается логарифмической кривой (рис. 12), называемой компрессионной. Для графического построения

компрессионной кривой на оси ординат откладывают значения коэффициента пористости e, а на оси абсцисс — давление P *кГ/см*².

Важнейшим показателем механических свойств грунтов, получаемым при компрессионных испытаниях, является коэффициент уплотнения, или коэффициент компрессии, характеризующий изменение пористости, а тем самым и объема породы при изменении нагрузки. Для давлений, обычно встречающихся в строительной практике (1—3—5 *кГ/см*² и редко больше), отрезок компрессионной кривой $k - l$ (рис. 13) принимают за прямую и при этом допущении коэффициент уплотнения определяется по формуле:

$$a = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1} \ см^2/кГ, \tag{19}$$

где P_1, P_2, e_1 и e_2 — нагрузки и соответствующие им коэффициенты пористости.

По значениям коэффициента уплотнения грунты разделяются на несколько видов: несжимаемые ($a < 0{,}001$ *см*²/*кГ*), слабо сжимаемые ($0{,}001 < a < 0{,}01$ *см*²/*кГ*), среднесжимаемые ($0{,}01 < a < 0{,}1$ *см*²/*кГ*) и сильно сжимаемые ($a > 0{,}1$ *см*²/*кГ*). Грунты несжимаемые и малосжимаемые являются надежным основанием для сооружений; при наличии в основании сооружений среднесжимаемых грунтов необходимо учитывать неравномерность осадок, что определяется соответствующими расчетами, и в соответствии с величиной неравномерных осадок принимаются те или другие конструктивные решения; при использовании в качестве оснований сильносжимаемых грунтов в большинстве случаев требуется искусственное укрепление подобных грунтов.

По результатам компрессионных испытаний определяют так называемый модуль деформации (сжимаемости) по формуле:

$$E = \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}\right) \frac{1+e_0}{a} \ кГ/см^2, \tag{20}$$

где e_0 — коэффициент пористости грунта в естественных условиях (начальный коэффициент пористости);

μ — коэффициент Пуассона (берется по табличным данным).

Коэффициент уплотнения и особенно модуль деформации являются важнейшими расчетными показателями, входя во все формулы, с помощью которых определяется осадка различных сооружений; методика подобных расчетов подробно излагается в курсе «Механика грунтов» [52].

Сопротивление грунтов сдвигу. Изучение сопротивления грунтов сдвигающим усилиям имеет большое практическое значение для обоснованного определения несущей способности грунтов основания, оценки устойчивости откосов, расчета давления горных пород на крепь подземных выработок, расчета давления грунта на подпорные сооружения и других инженерных расчетов.

Большинство исследователей считает, что сопротивление грунтов сдвигу обусловливается сопротивлением трения твердых частиц по

поверхности скольжения и сопротивлением сил сцепления, только в зависимости от состава грунтов и их физических свойств может преобладать та или другая составляющая.

В целом следует отметить, что если о природе сцепления существуют более или менее установившиеся теоретические представления, то о природе трения в связных грунтах таких воззрений не имеется, это свидетельствует о чрезвычайной физической сложности данного явления, еще недостаточно изученного. Поэтому приводимые ниже количественные показатели, характеризующие сопротивление сдвигу связных грунтов, показывают не физическую суть явлений, определяемых соответствующими терминами, а представляют собой в совокупности математические параметры сопротивления данных грунтов сдвигающим условиям, соответствующие определенной их плотности.

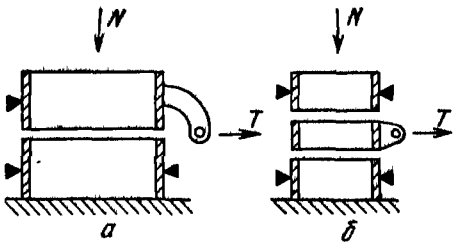


Рис. 14. Схема приборов для определения сопротивления грунтов сдвигу по одной (*а*) или двум (*б*) плоскостям сдвига

N — нормальное давление; T — сдвигающее усилие

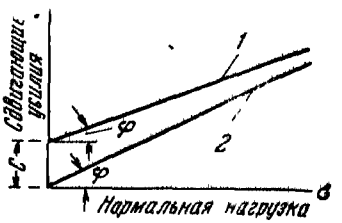


Рис. 15. График зависимости сопротивлений грунтов сдвигу от вертикальной нагрузки

1 — для связных грунтов; 2 — для несвязных грунтов

Показатели сопротивления грунта сдвигу определяются различными способами: по одной или двум заранее фиксированным в сдвиговых приборах плоскостям; путем раздавливания образцов при одноосном и трехосном сжатии; по углу естественного откоса. В практике лабораторных исследований нашей страны наиболее применимы способы первой группы, преимущественно по одной плоскости сдвига (рис. 14), для чего существуют самые различные приборы, отличающиеся только конструктивно (ДОРНИИ, Маслова — Лурье и др.).

Методика производства опытов по определению сопротивления грунтов сдвигу и описание применяемых при этом приборов излагается в специальных руководствах [53].

Результаты испытаний сопротивления грунтов сдвигу выражают в виде графика (рис. 15); на оси абсцисс откладывают нагрузки, а на оси ординат — соответствующие им сдвигающие усилия. Математически сопротивление грунтов сдвигу выражается уравнением К. Кулона:

$$\tau = \sigma \cdot f + C, \qquad (21)$$

где τ — сопротивление сдвигу, *кГ/см²*;
σ — нормальная нагрузка, *кГ/см²*;

f — коэффициент внутреннего трения; $f = \operatorname{tg} \varphi$, где φ — угол внутреннего трения;

C — сцепление.

Уравнение (21) показывает, что суммарное сопротивление сдвигу равно нормальному давлению, умноженному на коэффициент внутреннего трения, плюс некоторая постоянная C, которая свидетельствует о том, что даже при отсутствии нормального давления необходимо приложить какое-то сдвигающее усилие $\tau = C$ для достижения сдвига. Силу C, сопротивляющуюся сдвигу при отсутствии внешней нагрузки, называют сцеплением. Коэффициент внутреннего трения f и сцепление C являются важнейшими прочностными показателями и точное определение их — одна из основных задач при инженерно-геологических исследованиях. Следует только всегда иметь в виду то, что эти показатели являются переменными, завися от влажности, давления и других факторов.

В несвязных, бесструктурных, раздельнозернистых (они же сыпучие) грунтах силы сцепления ничтожны и применяемыми приборами не улавливаются, поэтому они приравниваются к нулю. Для подобных грунтов зависимость между сдвигающими и нормальными напряжениями при сдвиге выражается более простым уравнением

$$\tau = \sigma \cdot f. \qquad (22)$$

Графически эта зависимость изображается прямой, проходящей через начало координат (см. рис. 15). В чистых песках приближенно величина угла внутреннего трения соответствует углу естественного откоса, т. е. углу, при котором неукрепленный откос песчаного грунта является устойчивым, или углу, образуемому свободно насыпаемым песком. Угол естественного откоса определяется в воздушносухом состоянии и под водой с помощью приборов, конструкция которых и методика работы излагаются в специальных руководствах [53].

Сопротивление раздавливанию горных пород. Как указывалось, к скальным и полускальным относятся изверженные, метаморфические и сцементированные осадочные породы, связь между частицами у которых имеет кристаллизационный характер. Наличие жестких связей между частицами сближает эти породы с обычными твердыми телами, которые изучаются в сопротивлении материалов.

В качестве характеристик свойств скальных и полускальных пород используют данные о пределе их прочности на сжатие (сопротивление раздавливанию), об их морозоустойчивости и т. п. Для строительства гражданских и промышленных сооружений и подобных им наземных объектов скальные и полускальные породы, если они не полностью разрушены процессами выветривания, являются вполне удовлетворительными; при строительстве гидротехнических сооружений первостепенное значение при оценке этих пород имеет степень их трещиноватости и выветрелости, что детально изучается в процессе инженерно-геологических исследований.

Однако в практике инженерно-геологических исследований чаще всего ограничиваются испытанием прочности твердых пород на сжатие (раздавливание), так как этот показатель одновременно характеризует и степень выветрелости. Прочность на сжатие характеризуется временным сопротивлением породы сжатию или пределом прочности на сжатие, представляющим собой предельную нагрузку, при которой образец разрушается; выражают предел прочности в килограммах на квадратный сантиметр. Временное сопротивление *сжатию* невыветрелых изверженных пород и некоторых разностей метаморфических и осадочных пород (плотные известняки, кремнистые песчаники и т. п.) обычно превышает тысячу килограммов на квадратный сантиметр, снижаясь до сотен и десятков килограммов на квадратный сантиметр у выветрившихся разностей. Прочность большинства сцементированных осадочных пород колеблется в значительных пределах — от нескольких килограммов на квадратный сантиметр до десятков и сотен и зависит в основном от рода цемента и степени выветрелости породы в целом.

Крепость пород. В горном деле, а также при бурении скважин широко применяется понятие крепость пород, под которым понимается их общее сопротивление воздействию внешних сил при проходке или разработке; эта сопротивляемость выражается коэффициентом крепости пород, устанавливаемым для каждой породы по ряду показателей. М. М. Протодьяконов по величине коэффициента крепости все породы подразделил на 15 категорий; классификация Протодьяконова широко распространена и приводится во всех учебниках и справочниках по горному делу. При ведении разведочных работ — горнопроходческих и буровых — ныне применяют иные классификации пород по их крепости, причем отдельно для горнопроходческих работ и различных видов бурения (колонкового, ударно-механического, ручного); эти классификации приведены в ЕНВ и СУСНах на соответствующие виды работ.

ГЛАВА VI

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

§ 18. Происхождение подземных вод

Как указывалось в главе I, большинство исследователей полагает, что первоначально вода на Земле образовалась из магмы в процессе ее охлаждения и кристаллизации; магма же образовалась путем разогрева и переплавки холодного планетарного вещества за счет тепла от радиоактивных процессов. Большая часть атмосферных, наземных и подземных вод Земли образовалась путем так называемой «зонной плавки» (по А. П. Виноградову) вместе с выплавлением ее более легкой каменной оболочки — литосферы. И в настоящее время вода

образуется из вещества мантии, о чем свидетельствуют вулканические извержения, в составе летучих которых больше всего паров воды.

Частично вода на Земле образуется за счет потока космических частиц. Содержащиеся в них протоны захватывают в верхних слоях атмосферы электроны и превращаются в водород, который вступает в реакцию с кислородом воздуха и образует воду. По данным Л. С. Абрамова, таким путем получается ежегодно 1,5 $км^3$ воды, выпадающей в виде осадков на Землю.

На Земле протекают и противоположные процессы — убыль воды. Молекулы воды, достигая высоты 80 *км*, под воздействием солнечных лучей распадаются на атомы кислорода и водорода. Более тяжелые атомы кислорода остаются в верхних слоях атмосферы, а легкие атомы водорода устремляются в космос.

В практической деятельности человека существенное значение имеют воды, приуроченные к литосфере, в основном циркулирующие в осадочной толще, которые и называются подземными водами. Происхождение этих вод двояко: большей частью подземные воды образуются путем просачивания — инфильтрации атмосферных осадков, а частично — путем конденсации из воздуха при понижении температуры воздуха, находящегося в порах пород, до точки росы. Часть подземных вод образуется одновременно с осаждением терригенных материалов на дне водоемов, будучи захороненной в порах осадочных толщ; эти воды называются седиментационными.

В общем ходе круговорота воды на Земле наиболее активно участвуют воды инфильтрационного и конденсационного происхождения. Седиментационные воды, входящие в состав древних осадочных толщ, могут включаться в общий круговорот в результате геологических процессов (сжатия в складки, разрушения вышележащих толщ, образования трещин и т. п.) и их круговорот измеряется геологическими масштабами времени. Еще меньше доля участия в общем круговороте глубинных, восходящих из мантии потоков воды — ювенильных; их роль велика лишь в геологическом масштабе времени, обеспечивая общеземные накопления вод и их круговорот.

В местах залегания месторождений полезных ископаемых, ныне разрабатываемых, подземные воды образуются преимущественно путем инфильтрации. Об этом свидетельствует наблюдаемое почти во всех шахтах и рудниках увеличение притоков воды в горные выработки весной и после выпадения дождей, хотя и с некоторым запаздыванием.

§ 19. Классификация подземных вод

До настоящего времени единой общепринятой классификации подземных вод не существует. Это объясняется тем, что подземные воды залегают в земной коре в самых разнообразных геологических условиях, физические свойства их и химический состав чрезвычайно

разнообразны, находятся они постоянно в динамическом состоянии, требования к подземным водам при их эксплуатации самые различные.

В основу классификации подземных вод могут быть положены различные признаки: способ образования, условия залегания, гидравлические свойства, литологический состав водоносных пород, их возраст, физические свойства подземных вод, их химический состав и т. п.

По условиям образования подземные воды подразделяются на различные группы, из которых важнейшее значение имеют воды инфильтрационные и частично конденсационные.

По условиям залегания и характеру вмещающих горных пород подземные воды делятся на следующие типы: поровые воды, залегающие и циркулирующие в порах горных пород, которые слагают самую поверхностную часть земной коры; межпластовые воды, залегающие и циркулирующие в порах или трещинах осадочных горных пород, перекрываемых и подстилаемых водоупорными породами; в свою очередь они подразделяются на порово-пластовые и трещинно-пластовые; трещинные воды, циркулирующие в скальных (магматических, метаморфических и осадочных) породах, пронизанных равномерной трещиноватостью; карстовые воды, циркулирующие в массивах карбонатных, гипсоносных и соленосных раскарстованных пород; трещинно-жильные воды, циркулирующие в отдельных тектонических трещинах и в зонах тектонических разломов.

По гидравлическим свойствам подземные воды делятся на безнапорные, или воды со свободной поверхностью, и напорные, когда водоносный горизонт перекрыт сверху водоупорной породой и находящаяся в нем подземная вода испытывает гидростатическое давление, обусловливающее напор.

По температуре подземные воды подразделяются на холодные (ниже 20° С), теплые (20—37° С), горячие (37—42° С) и очень горячие (термы) — с температурой свыше 42° С.

По степени минерализации, или по содержанию растворенных солей, подземные воды, согласно предложению В. И. Вернадского, подразделяются на следующие виды: пресные, содержащие до 1 *г/л* растворенных веществ, солоноватые (1—10 *г/л* солей), соленые (10—50 *г/л* солей) и рассолы (свыше 50 *г/л* солей).

Классификация подземных вод по химическому составу приведена в главе VII.

Помимо солей в подземных водах всегда содержатся различные газы — углекислота, азот, сероводород и др., часто имеющие большое практическое значение. В зависимости от практической значимости растворенного в воде газа различают углекислые, сероводородные, радоновые и другие виды подземных вод. В большинстве случаев подобные воды имеют лечебные свойства (углекислые воды Кисловодского Нарзана, сероводородные воды

Мацесты, радоновые воды Цхалтубо и др.). Подземные воды, обладающие теми или иными лечебными свойствами, называются бальнеологическими.

Подземные воды, содержащие в растворенном виде какое-либо вещество в концентрациях, достаточных для практического извлечения этого вещества, называются промышленными (йодные, бром-йодные, бромные и т. п.).

ГЛАВА VII

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

§ 20. Физические свойства подземных вод

При гидрогеологических исследованиях определяются следующие главнейшие физические свойства подземных вод: температура, цвет, прозрачность, вкус, запах и удельный вес.

Температура подземных вод изменяется в широких пределах. В высокогорных районах и в области распространения многолетней мерзлоты она низкая, в последнем случае высокоминерализованные воды местами имеют даже отрицательную температуру (—5° С и ниже). В районах молодой вулканической деятельности, а также в местах выходов гейзеров (Камчатка, Исландия и др.) температура воды иногда превышает 100° С. Температура неглубоко залегающих подземных вод в средних широтах изменяется в пределах 5—12° С и обусловливается местными климатическими (в основном) и гидрогеологическими условиями.

При гидрогеологических исследованиях температура подземных вод измеряется непосредственно в источнике, колодце или скважине. Для измерения температуры применяют так называемые ленивые термометры, шарик у которых обернут теплоизолирующим материалом (ватой, шерстью и т. п.). При замерах температуры воды в глубоких скважинах, помимо обычных термометров, используются электротермометры и термоэлементы различной конструкции [43, 45].

Цвет подземных вод зависит от имеющихся в них механических или органических примесей. Желтоватый и буроватый цвет воде придают органические примеси; закисные соединения железа и сероводород придают воде зеленовато-голубую окраску. В большинстве своем подземные воды бесцветны. Цвет воды определяют в градусах путем сравнения с эталоном цветности. Удовлетворительной считается вода с цветностью не свыше 20°.

Прозрачность подземных вод зависит от содержания механических примесей, коллоидов и органических веществ. Прозрачность определяют при помощи цилиндра высотой 30—40 *см*, который ставят на специальный шрифт, затем через кран выпускают воду из цилиндра до тех пор, пока через оставшийся слой воды не станет ясно читаться этот шрифт. Высота оставшегося столба воды в сантиметрах и определяет степень ее прозрачности. Удовлетворительной считается вода при слое воды не менее 30 *см*.

Вкус подземной воде придают растворенные минеральные вещества, газы и примеси. Хлористый натрий придает воде сладковатый вкус при содержании до 500 *мг/л* и соленый — при содержании более 600 *мг/л*, сульфаты магния — горький, соли железа — терпкий или чернильный, органические вещества — сладковатый, гидрокарбонаты кальция и магния, а также свободная углекислота — приятный освежающий вкус. Слабо минерализованные дождевые воды имеют неприятный вкус. Вкус определяется по воде, подогретой до 20—30° С. Следует иметь в виду, что вкусовые ощущения субъективны.

Запах в подземных водах обычно отсутствует. Однако иногда подземная вода имеет запах тухлых яиц (наличие сероводорода), «болотный» запах, гнилостный, плесневелый и др. Питьевая вода не должна иметь запаха. Для точного определения запаха воду подогревают до температуры 50—60° С. Интенсивность запаха оценивается по пятибальной шкале; удовлетворительной считается вода с запахом не свыше 2 баллов.

Удельный вес вод примерно характеризует их минерализацию, выраженную в градусах Боме; один градус Боме соответствует 1% весового содержания в воде хлористого натрия. Ориентировочное определение удельного веса воды производят при помощи солемера, точнее с помощью пикнометра. Подробно методика определения физических свойств подземных вод изложена в специальных руководствах [45].

§ 21. Основные процессы формирования химического состава подземных вод

Подземные воды представляют собой сложные естественные растворы, находящиеся в многообразных связях и взаимодействии с окружающей природной средой. Естественная физико-географическая и геологическая обстановка определяет особенности генезиса и дальнейшего преобразования подземных вод. Современные типы подземных вод являются результатом длительной эволюции литосферы; на отдельных стадиях развития Земли этот процесс изменялся в зависимости от развития геоструктурных форм, что обусловливало изменение физико-географических условий, активности водообмена и т. п. Поэтому для правильного представления условий формирования и зональности подземных вод различных территорий, а следова-

тельно, и изучения подземных вод требуется учет не только современной природной обстановки, но и палеогидрогеологической обстановки предшествующих геологических периодов.

Химический состав подземных вод чрезвычайно сложен. Это обусловливается многими факторами: сложностью структуры вод; изотопным составом водорода и кислорода; сложностью состава горных пород, с которыми подземные воды взаимодействуют; сложностью биологических процессов, протекающих в них; непостоянством газового состава, различиями температур и давления на различных глубинах и др.

Структура воды обусловливается соединением молекул воды друг с другом при помощи водородных связей. Обычная вода имеет рыхлую ажурную тетраэдрическую структуру, легко изменяющуюся под воздействием внешних сил; только у льда наблюдается более определенное структурное состояние.

Основными процессами, формирующими химический состав подземных вод, являются растворение, гидролитическое разложение, ионный обмен, диффузионное выщелачивание, биологические, окислительные и восстановительные процессы. Помимо этих факторов, имеют также значение смешение вод, происходящее на участках соприкосновения вод различного происхождения; концентрация вод при испарении; другие сложные физико-химические процессы, происходящие в подземных водах при их взаимодействии с породами, газами и микроорганизмами.

Растворение. С химической точки зрения самое важное свойство воды — ее способность растворить тысячи различных веществ; вода является универсальным растворителем.

В земной коре содержатся различные легкорастворимые вещества, присутствующие в горных породах в виде примесей (хлоридов, сульфатов и др.) или же в виде залежей солей. При соприкосновении с водой подобные вещества переходят в раствор, в результате чего подземные воды обогащаются различными химическими элементами.

Гидролитическое разложение, или выщелачивание, — процесс избирательного растворения и выноса подземными водами какой-либо составной части горных пород. Гидролитическое разложение особенно интенсивно протекает в верхней части земной коры, что связано с энергично идущими здесь процессами выветривания. Вследствие выщелачивания некоторые составные части горных пород переходят в раствор и мигрируют с водами; в результате выщелачивания подземные воды обогащаются солями натрия, калия, кальция, магния и другими элементами.

Ионный обмен. Глинистый терригенный материал в обменном комплексе содержит катионы кальция, так как в водах суши в растворенном виде преобладают соли этого металла. При диагенезе глинистых осадков, отложившихся в морях, протекают процессы ионного обмена. Катионы кальция в обменном комплексе глинистых частиц обмениваются на катионы натрия, преобладающие в поровом

растворе глинистых осадков, поскольку морская вода, насыщающая поры осадков, содержит в растворенном виде главным образом соли натрия. В результате процессов ионного обмена химический состав подземных вод может существенно измениться.

Диффузионное выщелачивание происходит при длительном соприкосновении воды с породами. От процессов ионного обмена оно отличается тем, что во взаимодействие с катионами раствора вступают катионы, входящие в кристаллическую решетку минералов, являющихся составной частью горных пород.

Биологические, точнее микробиологические процессы имеют огромное значение для преобразования химического состава подземных вод. По мнению В. И. Вернадского, одним из наиболее активных веществ в земной коре является живое вещество — совокупность живых организмов. Поверхностные и подземные воды заселены большим количеством живых организмов. В районах нефтяных месторождений бактерии обнаружены на глубине более 2000 *м*. Жизнедеятельность организмов является активным фактором в формировании химического состава природных вод. Жизнедеятельностью организмов обусловлены следующие реакции: процессы окисления; процессы восстановления анаэробными бактериями, содержащимися в подземных водах; восстановление сульфатов до сероводорода; восстановление азотнокислых солей; концентрирование рассеянных элементов; формирование газового состава некоторых типов подземных вод и др.

Химический состав подземных и поверхностных вод, находящихся в тесном взаимодействии между собой, в сильной степени обогащается различными вредными веществами из-за сброса в водоносные горизонты, реки и водоемы промышленных и бытовых сточных вод.

Наибольшее влияние на загрязнение природных вод оказывают целлюлозно-бумажная, нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность, производство ядохимикатов и моющих средств и другие отрасли химической промышленности. В районах с развитым сельским хозяйством природные воды загрязняются минеральными удобрениями и отравляющими веществами, применяемыми для борьбы с вредителями и сорняками.

Все более усиливающееся загрязнение природных вод промышленными стоками обусловливает то, что для наиболее освоенных территорий нашей планеты основной проблемой в решении вопросов водоснабжения является не недостаток ресурсов природных вод, пригодных для использования, а их сильное загрязнение сточными водами.

Разработкой мероприятий, снижающих или полностью устраняющих возможность загрязнения поверхностных и подземных вод сточными водами, у нас в стране и за границей занимаются многие научно-исследовательские организации самого различного профиля, опыт работы которых обобщается на всесоюзных и международных совещаниях.

§ 22. Химический состав подземных вод

В природных водах в настоящее время обнаружено в растворенном виде свыше 80 элементов периодической системы Менделеева. Наиболее распространенными элементами в природных водах являются: Cl, S, C, Si, W, O, H, K, Na, Mg, Ca, Fe, Al; другие элементы встречаются реже и в небольших количествах.

Определение химического состава подземных вод при гидрогеологических исследованиях имеет большое значение. Руководствуясь существующими нормативами, практическая оценка изучаемых в данном пункте подземных вод (для водоснабжения, при строительстве, в горном деле, для орошения и других целей) может быть самой различной.

Свойства подземных вод определяются количеством и соотношением содержащихся в них в растворенном виде солей, присутствующих в воде в виде катионов и анионов. Среди катионов наибольшее практическое значение имеют H^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}; среди анионов OH^-, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-. В молекулярном и коллоидном состоянии почти во всех водах содержатся органические вещества и коллоиды. В молекулярном виде в подземных водах содержатся газы: CO_2, CH_4, O_2, N_2, H_2S, He и др.

Природные воды содержат в своем составе почти все известные радиоактивные элементы, но практическое значение приобрели воды, содержащие уран, радий и радон. Радиоактивные подземные воды широко используются в бальнеологии и при поисках различных полезных ископаемых, о чем подробнее будет сказано в главе XII.

Реакция воды, или концентрация водородных ионов, количественно выражается величиной pH, которая представляет собой десятичный логарифм концентрации ионов водорода (точнее, их активности), взятый с положительным знаком: $pH = lg\,(H^+)$. Знать эту величину необходимо для решения целого ряда теоретических и практических вопросов (оценка агрессивности подземных вод, их коррозирующей способности и др.). При температуре 22° С в чистой воде содержание водородных и гидроксильных ионов равно (порознь) 10^{-7}. Следовательно, для нейтральных вод $pH = 7$, при $pH > 7$ вода имеет щелочную реакцию, а при $pH < 7$ — кислую. По величине pH воды делятся на весьма кислые ($pH < 5$), кислые ($pH = 5—7$), нейтральные ($pH = 7$), щелочные ($pH > 7—9$) и высокощелочные ($pH > 9$). Подземные воды в большинстве своем имеют слабощелочную реакцию. Воды сульфидных и особенно колчеданных и каменноугольных месторождений обычно являются кислыми и часто весьма кислыми.

Определение концентрации водородных ионов должно проводиться на месте взятия проб воды. Наиболее распространенный способ определения колометрический, основанный на свойстве индикаторов менять свою окраску в зависимости от концентрации водородных ионов.

Жесткость воды — особое ее качество, обусловленное присутствием ионов Ca^{2+} и Mg^{2+}. Жесткость подземных вод имеет большое значение при их оценке для практического использования. Жесткая вода плохо взмыливается, дает накипь в паровых котлах (что уменьшает их теплопроводность, приводит к перерасходу топлива и может вызвать аварию) и в посуде, вспенивается, в жесткой воде медленнее разваривaются овощи, мясо, крупы и другие продукты.

Различают: общую жесткость, обусловленную содержанием в воде всех солей кальция и магния — $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$, $CaSO_4$, $MgSO_4$, $CaCl_2$, $MgCl_2$; карбонатную, или временную, обусловленную наличием в воде бикарбонатов (солей HCO_3) кальция и магния, удаляемых при кипячении вследствие их разрушения и перехода в слаборастворимые карбонаты, выпадающие в осадок; некарбонатную, или постоянную, остающуюся в воде после удаления из нее бикарбонатов, равную общей минус карбонатная.

Раньше жесткость выражали в немецких градусах. За один градус жесткости условно принимали жесткость воды, отвечающую содержанию в 1 *л* 10 *мг* CaO. В настоящее время в СССР согласно ГОСТу 2874—54 жесткость воды выражают в миллиграмм-эквивалентах Ca^{2+} и Mg^{2+} на 1 *л* воды; 1 *мг·экв* соответствует содержанию 20,04 *мг/л* Ca^{2+} или 12,16 *мг/л* Mg^{2+} и равен 2,8° немецких (по старому способу выражения жесткости).

Для питьевых целей наиболее подходящими являются подземные воды с общей жесткостью 3—7 *мг·экв*. В засушливых и полузасушливых районах нередко используются воды с жесткостью до 14 *мг·экв* и выше.

Жесткие воды непригодны для многих отраслей промышленности: бумажной, сахарной, кожевенной, пивоваренной, для питания паровых котлов и т. п. В случае необходимости использования жестких вод для тех или иных целей их приходится обрабатывать специальными способами для снижения жесткости до требуемых норм.

Щелочность обусловливается наличием в воде щелочей натрия (NaOH), карбонатов и бикарбонатов натрия (Na_2CO_3 и $NaHCO_3$). В зависимости от анионов, обусловливающих щелочность, различают гидратную, карбонатную и бикарбонатную щелочность. Выражают щелочность в миллиграмм-эквивалентах на литр; 1 *мг·экв/л* щелочности соответствует содержанию 40 *мг/л* NaOH, 53 *мг/л* Na_2CO_3 и 84,22 *мг/л* $NaHCO_3$. Общая щелочность (сумма всех видов) является важной характеристикой подземных вод, используемых для паросиловых установок и охлаждающих устройств.

Понятие о химических анализах вод. Химический анализ природных вод в практике гидрогеологических исследований проводится для решения следующих задач: изучения закономерностей формирования и распространения подземных вод различного состава; поисков различных месторождений полезных

ископаемых; оценки подземных вод как химического сырья для получения йода, брома, бора, меди и других веществ; оценки состава и свойств подземных вод для питьевого, технического, сельскохозяйственного, лечебного и других видов использования. Для общей характеристики подземных вод применяют три типа анализов: полевой, сокращенный и полный.

Способы отбора проб воды на анализ должны обеспечивать максимальное сохранение солевого и газового состава исследуемой воды.

Перечень необходимых определений веществ, содержащихся в подземных водах, устанавливается в соответствии с целевым назначением анализа. Например, при оценке воды для питьевых целей очень большое значение имеют даже ничтожные примеси соединений азотистой кислоты и аммиака, служащие индикаторами возможного загрязнения подземных вод патогенными бактериями. Если же вода предназначается для охлаждения, то указанные вещества никакого значения не имеют и определять их не следует. При характеристике лечебных вод очень важно определение веществ, содержащихся даже в незначительном количестве, но придающих этим водам целебные свойства.

Важное место в исследовании подземных вод занимают полевые анализы, выполняемые непосредственно у водоисточника, для чего используются полевые гидрохимические лаборатории (системы Резникова и Соколова, Резникова и Муликовской, ВСЕГИНГЕО—ВСЕГЕИ), описание которых приведено в «Справочном руководстве гидрогеолога» [45]. Сокращенные и полные анализы проводятся в стационарных лабораториях. Методы анализов в зависимости от целевого назначения различны и излагаются в многочисленной специальной литературе, приведенной в «Справочном руководстве гидрогеолога».

Способы выражения химического состава подземных вод. Химический анализ показывает состав растворенных в воде веществ, которые выражают в ионной, миллиграмм-эквивалентной и процент-миллиграмм-эквивалентной формах. При ионной форме количество каждого иона выражается в миллиграммах или граммах (для высокоминерализованных вод) на 1 *л* воды. Находящиеся в воде ионы взаимодействуют между собой в строго определенных эквивалентных весовых соотношениях; поэтому для пересчета анализа из ионной формы в миллиграмм-эквивалентную следует число миллиграммов каждого иона разделить на его эквивалентный вес, который представляет собой отношение атомного (или ионного) веса данного элемента к его валентности. Для пересчетов анализов из ионной формы в миллиграмм-эквивалентную имеются специальные таблицы.

Для более наглядного представления о соотношениях между ионами и сопоставления химических анализов различных вод количество миллиграмм-эквивалентов каждого иона выражают еще в процент-эквивалентах от суммы катионов и суммы анионов, принимая каждую из сумм за 100%.

Для выражения химического состава воды существует много формул и графических способов [43, 45]. Наиболее удобна формула М. Г. Курлова, представляющая собой псевдодробь, в числителе которой в убывающем порядке в процентах миллиграмм-эквивалентов пишется содержание анионов, а в знаменателе — катионов; перед дробью после буквы *М* пишется общая минерализация в граммах на литр, затем количество свободных газов (если они определялись) и содержание редких элементов; после дроби пишется температура. Например, по формуле М. Г. Курлова один из анализов воды выразится в следующем виде (ионы при содержании их менее 10% в этой формуле не показываются):

$$M_{1,5}\text{Br}\,0{,}002\,\text{H}_2\text{S}\,0{,}01\,\frac{\text{HCO}_3\,84\,\text{SO}_4\,12}{\text{Ca}\,73\,\text{Mg}\,19}\,T8°.$$

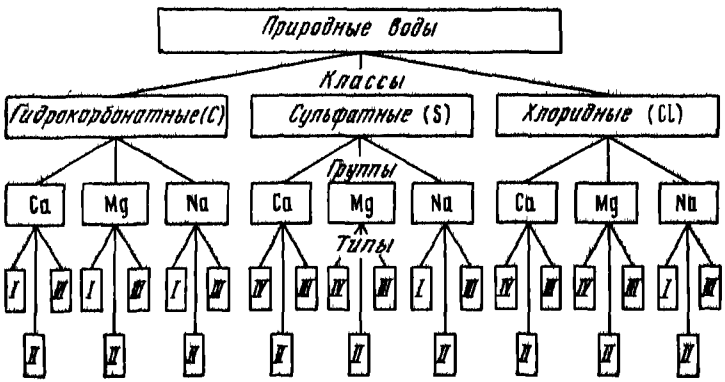


Рис. 16. Схема классификации природных вод по химическому составу (по О. А. Алекину)

Приведенная формула свидетельствует, что данная вода относится к гидрокарбонатному кальциевому типу и поскольку в ней содержатся бром и сероводород, то ее следует называть также сероводородно-бромной.

Графически химический состав подземных вод может быть выражен в виде треугольника, квадрата, круга и иными способами, рассматриваемыми в соответствующих руководствах [43, 45].

Классификация подземных вод по химическому составу. Единой общепринятой классификации подземных вод в зависимости от их химического состава не существует. Это обусловлено чрезвычайно разнообразным качественным и количественным химическим составом природных вод. Наиболее удобны те классификации, которые построены на принципе деления вод по преобладающим ионам (катионам и анионам) и по соотношению

между ними, к которым относится классификация, предложенная в 1948 г. О. А. Алекиным (рис. 16).

Все природные воды О. А. Алекин по преобладающему аниону делит на три больших класса: гидрокарбонатные, сульфатные и хлоридные, которые сразу же в общих чертах дают гидрохимический облик воды. Классы уточняются дальнейшим делением на три группы по преобладающему катиону: кальциевые, магниевые и натриевые. Каждая группа в свою очередь разделяется на три типа вод по соотношению между ионами.

Существуют и иные классификации природных вод по химическому составу — В. А. Александрова, С. А. Щукарева и других, подробно характеризуемые в специальных руководствах [43, 45].

§ 23. Нормы оценки качества воды для питья и технических целей

Оценка качества питьевой воды. Питьевая вода должна быть бесцветной, прозрачной, иметь температуру от 4 до 15° С, не иметь неприятного вкуса и запаха, не содержать болезнетворных бактерий и солей тяжелых металлов.

При выборе и оценке воды источника централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения пользуются государственными стандартами (ГОСТ 2761—57, 2874—54 и др.). Сухой остаток в воде не должен превышать 1000 *мг/л*. Возможность повышения сухого остатка и предельное содержание сульфатов, хлоридов и магния устанавливаются органами государственной санитарной инспекции в зависимости от местных условий. Общая жесткость воды должна быть не выше 7 *мг·экв* и в исключительных случаях не более 14 *мг·экв*. При большей жесткости вода должна умягчаться. В отдельных районах, например в сухих степях Северного Кавказа и Украины, используют из-за отсутствия лучшей воду с содержанием сухого остатка до 1500—2500 *мг/л*, хлора до 450—600 *мг/л*, сульфатов до 300—500 *мг/л* и жесткостью 10—14 *мг·экв*.

Совершенно не допускается в питьевой воде совместное присутствие аммиака и азотистой кислоты, указывающих на современную фекальную загрязненность.

Питьевая вода, подаваемая без очистки, может содержать свинца не более 0,1 *мг/л*, мышьяка 0,05 *мг/л*, фтора 1,5 *мг/л*, меди 3 *мг/л*, цинка 5 *мг/л*, железа 1 *мг/л*, урана 0,6 *мг/л*, ртути 0,005 *мг/л* и не должна содержать следов других ядовитых веществ.

В воде должны отсутствовать бактерии брюшного тифа, холеры и дизентерии. Показателем загрязненности воды патогенными бактериями служит кишечная палочка коли. Палочка коли сама по себе безвредна, но указывает на то, что в воду попали канализационные стоки, в составе которых могут быть и болезнетворные бактерии. Загрязненность воды оценивается величиной *коли-титра*, представляющей собой объем воды в кубических сантиметрах, в котором

содержится одна кишечная палочка. Для водопроводов, подающих воду без очистки, допускается *коли-титр* 300 *см*^{3} и более. В последнее время в СССР бактериальную чистоту воды принято оценивать *коли-тестом*, выражающим количество кишечных палочек в 1 *л* воды; по ГОСТ коли-тест не должен превышать 3.

Оценка качества технической воды. Каждое производство (бумажное, кожевенное, консервное и др.) предъявляет свои требования к воде, с учетом которых и дается оценка пригодности воды. Обычно вода для промышленных целей должна быть прозрачной, бесцветной, без запаха и мягкой.

Вода, идущая на питание паровых котлов, оценивается накипеобразованием, вспениванием и коррозией стенок котла, вычисляемыми по особым формулам, приведенным в справочниках и специальной литературе. Для питания котлов вода должна иметь сухой остаток не более 300 *мг/л*, содержать хлора менее 200 *мг/л*, агрессивная кислота должна отсутствовать, жесткость должна быть менее 1,8 *мг·экв* для трудноочищаемых котлов и 3 *мг·экв* для легкоочищаемых и удовлетворять некоторым другим требованиям. Особенно высокие требования предъявляются к воде, идущей на питание паровых котлов современных ТЭЦ, вырабатывающих пар высоких параметров.

Агрессивность воды по отношению к бетону и железу. Агрессивной по отношению к бетону обычно является вода, содержащая сульфаты сверх допустимого количества и агрессивную углекислоту. Соответственно различают сульфатную и углекислую агрессию воды. Кроме того, агрессивность может быть выщелачивающая, магнезиальная и кислородная.

Сульфатная агрессия. При наличии в воде повышенного количества сульфатов (SO_4^{2-}) происходит кристаллизация в бетоне новых соединений; образуются гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) с увеличением объема на 100% и сульфоалюминат кальция (бетонная бацилла) с увеличением объема в 2,5 раза, что и приводит к разрушению бетона.

При *углекислой агрессии* (при воздействии агрессивной угольной кислоты) происходит растворение и выщелачивание из бетона составных частей, в той или иной мере растворимых в воде (главным образом извести $CaCO_3$, составляющей основную часть цемента).

Агрессивность выщелачивания происходит за счет растворения и вымывания из бетона извести при малом содержании в воде HCO_3^-.

Общекислотная агрессия обусловлена низким значением водородного показателя pH, вследствие чего усиливается растворение извести.

Магнезиальная агрессия, как и сульфатная, ведет к разрушению бетона при проникновении в тело бетона воды с повышенным содержанием Mg^{2+}.

Кислородная агрессия обусловливается наличием в воде кислорода и проявляется преимущественно по отношению к металлическим

предметам (трубам, насосам, рельсам и т. п.), вызывая их ржавление (*коррозию*).

Вообще агрессивность подземных вод детально учитывается в соответствии с требованиями «Инструкции по проектированию. Признаки и нормы агрессивности среды для железобетонных и бетонных конструкций» СН 249—63.

Распределение природных вод, которые могут быть использованы для питьевого и хозяйственно-технического водоснабжения в их естественном состоянии, крайне неравномерно, хотя общие водные ресурсы Земли колоссальны. Из-за неравномерности распределения пресных вод около $^1/_3$ населения нашей планеты испытывает острый недостаток воды; особенно большую нужду в ней испытывают развивающиеся страны Африки и Азии и ряд южных районов СССР.

Ресурсы высокоминерализованных вод на Земле (морских, озерных и подземных) огромны и находятся они всюду. Поэтому обеспечение все более растущих потребностей в воде будет решаться (и частично уже решается) путем опреснения соленых морских и подземных вод и очисткой сточных вод.

Улучшение качества воды. В настоящее время качество непригодной в естественном состоянии воды улучшают различными способами: осветлением, хлорированием, умягчением, физико-химической и химической обработкой.

Для осветления воды ее фильтруют, пропускают через пористые вещества (гравий, песок, пористый камень, сетки и т. п.). Часто после осветления воду обрабатывают коагулянтами, которые, вступая во взаимодействие с находящимися в воде солями, образуют хлопья; последние выпадают, увлекая за собой взвеси и бактерии. В качестве коагулянтов чаще всего используются сернокислый алюминий, железный купорос, алюминат натрия и др.

В случае большого количества микроорганизмов (коли-титр менее 300), среди которых могут быть и болезнетворные, воду обеззараживают *хлорированием*, *озонированием* или *бактерицидным* облучением.

Умягчение воды предназначено для уменьшения содержания в ней солей кальция и магния, обусловливающих ее жесткость. Широкое распространение получили следующие способы умягчения: содово-известковый, цеолитовый, при помощи пермутитовых фильтров, ионно-обменных смол и дистилляция (выпаривание с последующим охлаждением).

При *содово-известковом способе* умягчения в воду вначале вводят известь, которая переводит бикарбонаты в труднорастворимые соли (устранение временной жесткости), а затем соду, которая вызывает выпадение солей постоянной жесткости. Образовавшийся шлам отделяют в отстойниках-осветителях.

При *цеолитовом способе* воду пропускают через фильтр, наполненный цеолитовым песком (зеленым глауконитовым песком или другим цеолитом). Содержащиеся в цеолитах натрий и калий всту-

дают в обменную реакцию с кальцием и магнием, находящимися в воде (в виде ионов), снижая тем самым жесткость воды. *Пермутитовые фильтры* представляют собой искусственные цеолиты, легко регенерируемые пропусканием через них раствора поваренной соли.

Все большее распространение получают способы умягчения воды и даже полного обессоливания методами *ионного* обмена при помощи искусственно изготавливаемых ионнообменных смол — катионитов и анионитов, с помощью которых можно получить в больших количествах пресную воду, обрабатывая сильно засоленные воды, а также извлекать ценные металлы, находящиеся в подземных или сточных водах в малых концентрациях.

В последние годы разрабатываются *способы электрохимического обессоливания и опреснения воды* с применением в качестве электродов специальных ионнообменных мембран, устанавливаемых в многокамерных электроионитовых опреснительных установках, разработанных Московским научно-исследовательским институтом пластических масс. При помощи электрохимического способа, используя специальные ионитовые диафрагмы, можно также извлекать из растворов редкие элементы и другие вещества.

Имеющиеся в пустынных районах колоссальные запасы подземных вод, а также воды, находящиеся вблизи морей и озер, являются высокоминерализованными и поэтому без обработки не могут быть использованы. Наиболее успешно проблема опреснения этих вод будет решаться путем дистилляции соленых вод. В СССР, а также в США разрабатываются способы дистилляции соленых вод с помощью атомных реакторов большой мощности с одновременным использованием получаемого тепла для производства электроэнергии. Атомные реакторы будут в ближайшее время единственно мощными источниками дешевого тепла для обеспечения рентабельной работы опреснительных дистилляционных установок.

Работы научно-исследовательских институтов проводятся в трех направлениях: 1) разработка методов механической очистки сточных вод; 2) изучение и разработка биохимических методов очистки; 3) разработка физико-химических методов очистки загрязненных вод. Главным направлением в охране вод является комплекс мероприятий, осуществление которых может дать нужный эффект.

Страны члены СЭВ начиная с 1962 г. осуществляют систематическое сотрудничество в области разработки комплексных мероприятий по защите воды от загрязнения.

В масштабе всей планеты для обеспечения водой населения, нужд промышленности и сельского хозяйства необходимы разработка более рациональных методов использования водных ресурсов, выявление новых запасов подземных вод, разработка более совершенных способов улучшения качества природных вод и очистки сточных вод. Решению этих грандиозных задач посвящено проведение Международного гидрологического десятилетия, начавшегося

в 1965 г. Его программа предусматривает изучение водных ресурсов всего земного шара (морских, озерных, речных, подземных вод, ледников), систематизацию данных для составления водного баланса отдельных континентов, государств и районов, исследование процессов, определяющих общий круговорот воды и возможности изменения его человеком, в том числе путем искусственного восполнения запасов подземных вод, обобщение работ по улучшению качества природных и загрязненных вод и т. п. В работах по этой программе принимают участие все государства члены ООН.

ГЛАВА VIII

ВЕРХОВОДКА И ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ

§ 24. Общие сведения

При характеристике горных пород в гидрогеологическом отношении применяются следующие понятия и термины, характеризующие различные формы скопления подземных вод в породах.

Водоносные породы — пласты, линзы и другие формы залегания водопроницаемых пород, в которых поры, трещины и другие пустоты заполнены гравитационной водой.

Водоносный горизонт — подземные воды, приуроченные к одному или нескольким регионально выдержанным водоносным (или пачкам водоносных пород) гидродинамически связанным между собой и имеющим единую (общую) гидравлическую (при безнапорных водах) или пьезометрическую (при напорных водах) поверхность.

Водоносный комплекс — подземные воды, приуроченные к водоносным породам какого-либо стратиграфического подразделения, среди которых вследствие изменчивости их вещественного состава, сложности тектонических условий или недостаточной изученности водовмещающих пород нельзя выделять отдельные гидравлически самостоятельные водоносные горизонты.

Площадь, в пределах которой распространен водоносный горизонт или водоносный комплекс, называется областью, или площадью, их распространения, а площадь, где происходит питание водоносного горизонта, — областью питания. Площадь, где подземные воды вытекают из водоносного горизонта или водоносного комплекса, называется областью разгрузки, или дренажа.

Области питания и распространения водоносных горизонтов (комплексов) могут совпадать (в случае безнапорных вод) и не совпадать (в случае напорных вод).

§ 25. Воды зоны аэрации, грунтовые воды и особенности их залегания

Воды зоны аэрации — это воды, залегающие выше зоны насыщения горных пород. К ним относятся почвенные воды и верховодка. Почвенные воды приурочены к почвенному слою; они имеют большее значение для плодородия почв и в основном изучаются почвоведами, агрохимиками и агрономами. При гидрогеологических исследованиях почвенные воды изучаются в связи с осушением и орошением земель, а также при выяснении закономерностей режима грунтовых вод, залегающих непосредственно под почвенными горизонтами.

Верховодка. Если в толще водопроницаемых пород залегает линза слабо- или водонепроницаемых пород, то инфильтрующиеся сверху в водопроницаемые породы осадки, достигая линзы *А* (рис. 17), задерживаются, скапливаются, образуя как бы самостоятельный водоносный горизонт *Б*, располагающийся выше грунтовых вод *В*. Подобная разновидность подземных вод называется верховодкой. Характерным ее отличием является относительно небольшое площадное распространение, залегание в зоне аэрации, сезонность существования, сравнительно небольшая мощность водонасыщенной породы, небольшие запасы. При ведении работ по отрывке выемки или по вскрытию месторождений полезных ископаемых (гравия, песка и т. п.) наличие верховодки в откосах выемки может обусловить образование оплывин, сплывов и даже оползней. Поэтому выявление верховодки и своевременное ее дренирование совершенно необходимо при устройстве карьеров и других подобных сооружений.

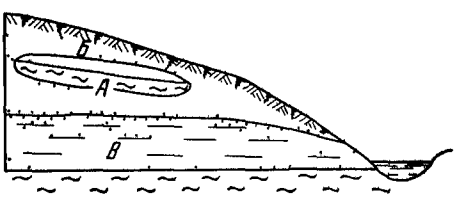


Рис. 17. Схема залегания верховодки

Грунтовые воды — подземные воды первого от поверхности постоянно существующего водоносного горизонта, расположенного на первом водонепроницаемом слое (см. рис. 17, *В*). Грунтовые воды распространены почти повсеместно. В жизни человека они имеют огромное значение. Почти все сельские населенные пункты, а также многие города обеспечивают свои потребности в воде путем использования грунтовых вод.

Грунтовые воды имеют свободную поверхность, т. е. являются безнапорными. Расстояние от водоупора до поверхности грунтовых вод называется мощностью водоносного горизонта. Поверхность грунтовых вод называется уровнем, скатертью или зеркалом (чаще) грунтовых вод. Глубина залегания зеркала грунтовых вод различна: от долей метра в зонах избыточного увлажнения до нескольких десятков метров в степных районах Украины и Северного Кавказа.

Выше зеркала грунтовых вод, как указывалось, расположена зона аэрации. В породах этой зоны (в порах, трещинах и других пустотах) находится физически связанная и капиллярная вода, а часть пустот занята парообразной влагой и воздухом.

Областью разгрузки (дренирования) грунтовых вод являются близлежащие долины рек и оврагов, которые называются местным базисом подземного стока.

Для грунтовых вод характерны следующие признаки: неполное заполнение ими водопроницаемого пласта; совпадение области питания с областью их распространения; отсутствие напора; постоянные колебания уровней, обусловливающие изменение мощности водоносного горизонта и тем самым запасов грунтовых вод во времени;

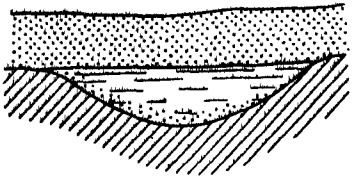


Рис. 18. Схема бассейна грунтовых вод

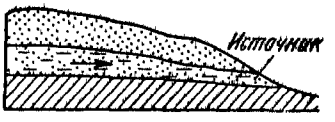


Рис. 19. Схема потока грунтовых вод

изменение во времени физических свойств, химического, газового и бактериального состава; легкая загрязненность различными веществами, вносимыми в грунтовые воды инфильтрующейся с поверхности водой. Грунтовые воды гидравлически связаны с поверхностными водотоками и водоемами. Питание грунтовых вод происходит в основном путем инфильтрации атмосферных осадков и частично за счет конденсации.

Грунтовые воды, у которых зеркало представляет собой горизонтальную поверхность, называется бассейном грунтовых вод; последние образуются при наличии в водоупорном ложе котловин (рис. 18). Грунтовые воды с наклонным зеркалом называются потоком грунтовых вод (рис. 19). В природных условиях часто наблюдается сочетание потоков грунтовых вод с бассейнами.

§ 26. Карты гидроизогипс

Карта гидроизогипс показывает положение зеркала грунтовых вод в изолиниях на какой-либо период времени в зависимости от рельефа, условий питания, дренирования и строения водовмещающих толщ (рис. 20). Их строят так же, как и изогипсы рельефа земной поверхности, для чего уровни в колодцах и скважинах (где проводились замеры) с одинаковыми отметками соединяют плавной линией. Имея карту гидроизогипс и рельефа поверхности земли можно легко определить глубину залегания зеркала грунтовых

вод в любой точке, изображенной на карте (для чего необходимо вычесть из отметки поверхности земли отметку зеркала грунтовых вод), направление движения грунтовых вод, что выразится направлением перпендикуляра, проведенного между соседними гидроизогипсами в сторону гидроизогипсы с меньшей отметкой, а также уклон грунтового потока, для чего берут разность отметки между гидроизогипсами и делят на расстояние между ними.

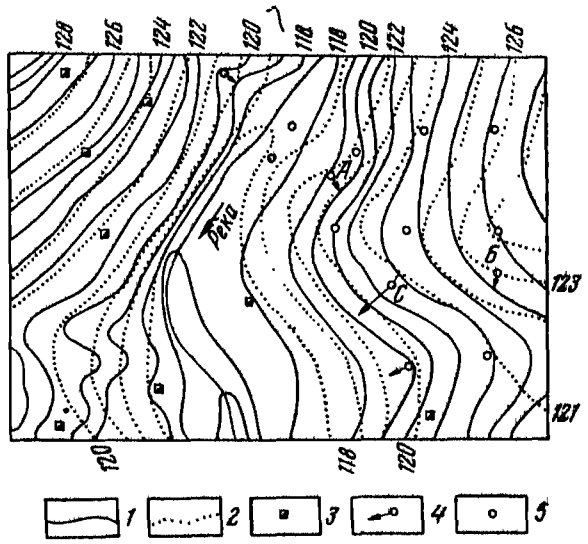


Рис. 20. Карта гидроизогипс

1 — горизонтали поверхности земли; *2* — гидроизогипсы; *3* — колодцы; *4* — родники; *5* — скважины

Между грунтовыми и поверхностными водами существует постоянная гидравлическая связь. В период весенних половодий, а также при выпадении обильных осадков уровень поверхностных вод (рек, озер, прудов, водохранилищ) повышается и может превысить уровень грунтовых вод на прилегающих территориях, что обусловливает питание грунтовых вод за счет поверхностных. В меженный период наблюдается обратное явление — грунтовые воды питают поверхностные водоемы (рис. 21). О характере гидравлической связи между поверхностными и грунтовыми водами нагляднее всего можно судить по карте гидроизогипс (рис. 22).

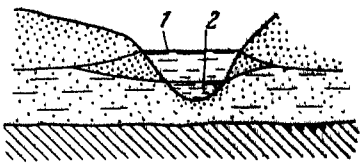


Рис. 21. Взаимодействие поверхностных и грунтовых вод

1 — поверхностные воды питают грунтовые в период половодья; *2* — грунтовые воды питают поверхностные в межень

При гидрогеологических исследованиях определение характера взаимодействия изучаемого водоносного горизонта с поверхностными водами во времени является важной задачей, так как это имеет

существенное значение при решении вопросов водоснабжения, борьбы с притоками грунтовых вод в котлованы, выемки и другие сооружения.

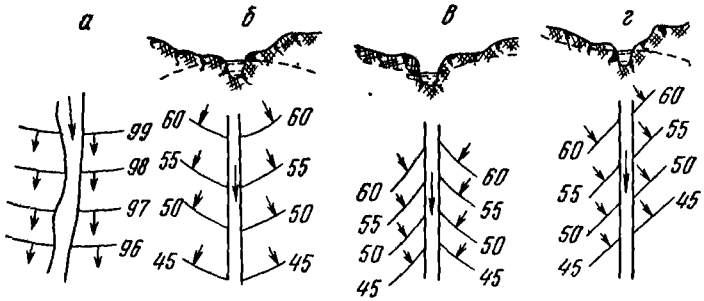


Рис. 22. Различные случаи соотношения между поверхностными и грунтовыми водами

а — гидроизогипсы пересекают водоем без искривления, гидравлическая связь между грунтовыми и поверхностными водами отсутствует, *б* — река питает грунтовые воды, *в* — грунтовые воды питают реку, *г*— река дренирует грунтовые воды с одной стороны (слева) и питает с другой (справа)

§ 27 Зональность грунтовых вод

Изучая грунтовые воды в разных областях нашей страны, русские ученые (П. В. Отоцкий, В. С. Ильин, О. К. Ланге, Г. Н. Каменский и др.) обратили внимание на то, что количество, качество и глубина залегания грунтовых вод зависят не только от геологических факторов, но также и от общегеографических, особенно климатических. В распределении грунтовых вод имеется определенная зональность, соответствующая климатическим зонам. Идея зональности в природе впервые была сформулирована знаменитым русским ученым В. В. Докучаевым. В применении к грунтовым водам идею зональности плодотворно развивал ученик В. В. Докучаева П. В. Отоцкий, а позднее — В. С. Ильин; последний выделил не только зональные грунтовые воды, но установил и наличие азональных. В. С. Ильиным же впервые была составлена карта грунтовых вод для Европейской части территории СССР.

В последние годы О. К. Ланге, Г. Н. Каменский, И. В. Гармонов, И. К. Зайцев, М. П. Распопов опубликовали свои карты зональных грунтовых вод, построенные на несколько иных принципах [45].

Г. Н. Каменский на территории СССР выделил следующие генетические типы грунтовых вод (рис. 23). Воды зоны выщелачивания (см. рис. 23, зоны *1*, *2* и *4*) имеют распространение в районах с избыточным увлажнением на участках; химический состав грунтовых вод здесь формируется под влиянием процессов выщелачивания почв и пород при выветривании и почвообразовании. Зона континентального засоления (*3*, см. рис. 23) характеризуется малым количеством атмосферных осадков, интенсивным испарением и почти

полным отсутствием естественного дренажа. Химический состав грунтовых вод в этой зоне формируется за счет солей, накопившихся в результате испарения.

Изучение зональности грунтовых вод необходимо не только для выяснения условий формирования и режима этих вод, но и при выборе их для практического использования (для водоснабжения, при орошении, осушении и пр.).

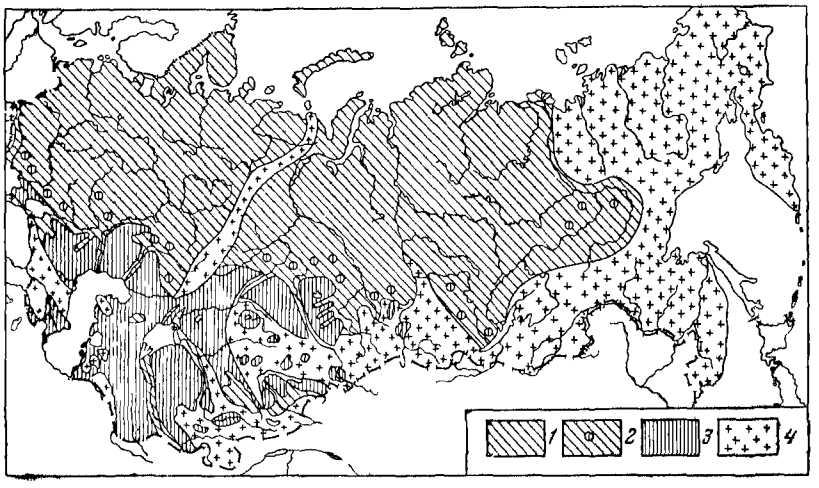


Рис 23. Карта-схема зональности грунтовых вод СССР (по Г. Н. Каменскому)

1 — грунтовые воды зоны выщелачивания, *2* — грунтовые воды выщелачивания с интразональными участками вод континентального засоления (показаны кружками), *3* — грунтовые воды континентального засоления, *4* — грунтовые воды выщелачивания горных районов

§ 28. Основные типы грунтовых вод

Грунтовые воды речных долин. Грунтовые воды речных долин имеют большое народнохозяйственное значение; они широко используются для водоснабжения населенных пунктов. Речные долины обычно выполнены песчано-глинистыми образованиями, причем верхняя их часть сложена суглинками и глинами, а нижняя — песками и нередко гравием и галькой. Вследствие этого наиболее водообильной является нижняя часть аллювиальных отложений. Часто по долинам рек наблюдаются переуглубленные участки коренного ложа, представляющие собой древние русла, выполненные более грубообломочным материалом — крупнозернистыми песками, гравием и даже галькой. Наличие подобных древних погребенных русел отмечено по долине Днепра, его правых притоков — Тетерева, Ингульца и др., по долине Волги и на других реках. К древним погребенным руслам обычно приурочены мощные потоки грунтовых вод с расходом до сотен и тысяч кубометров в сутки. Следовательно, при гидрогеологических исследованиях наличие

подобных перегубленных участков необходимо выявлять и изучать. Глубина залегания грунтовых вод аллювия изменяется от долей метра до 15 *м* и более. По химическому составу воды аллювиальных отложений в большинстве маломинерализованы, относятся к гидрокарбонатным кальциевым. Эксплуатируются грунтовые воды речных долин колодцами.

Грунтовые воды ледниковых отложений. Отложения ледникового комплекса широко распространены на территории Европейской части СССР, главным образом в северной ее половине, в Польше и других странах. Представлены они неотсортированными валунными глинами и суглинками, а также песками и галечниками, к которым приурочены мощные потоки грунтовых вод, широко используемые для водоснабжения даже крупных городов. Москва долгое время (до конца XIX века) снабжалась водами ледниковых отложений, развитых в районе Мытищ. Многие города в Европейской части СССР, в Польше и других странах удовлетворяют свои нужды за счет эксплуатации вод ледниковых отложений.

Грунтовые воды степей, полупустынь и пустынь. Степи и особенно пустыни и полупустыни (районы Прикаспия и Средней Азии) характеризуются малым количеством осадков (около 150—200 *мм*) и значительным испарением (до 2500 *мм*). Речная сеть здесь развита слабо, а протекающие реки относятся к «транзитным»; они не получают питания по пути движения (нижняя часть Волги, Терека, Амударья, Сырдарья и др.).

На поверхности в указанных районах залегают на значительных площадях лёссовидные и глинистые породы, слабо пропускающие осадки, которые в основном тратятся на испарение, частично на сток и в незначительной степени на инфильтрацию.

Общие физико-географические и особенно климатические условия для накопления грунтовых вод в степях, пустынях и полупустынях крайне неблагоприятны. Этим и объясняется то, что в указанных районах вопросы водоснабжения весьма сложны, так как имеющиеся здесь грунтовые воды, наиболее доступные для водоснабжения, как правило, сильно минерализованные. В степях, на возвышенных участках (водоразделах) грунтовые воды к тому же обычно находятся на большой глубине и тоже минерализованы.

В последние годы в пустынных районах выявлены линзы пресных вод, залегающих на соленых; площадь линз пресных вод иногда достигает нескольких тысяч квадратных километров, а мощность — десятков метров. Минерализация воды в пресных линзах обычно не превышает 1 *г/л*, достигая иногда 2 *г/л*. Запасы пресных вод в подобных линзах нередко достигают нескольких кубических километров. О происхождении линз пресных вод в пустынях единого мнения нет. Воды этих линз широко используются для водоснабжения.

Грунтовые воды предгорных и горных областей. В предгорных и горных областях количество атмосферных осадков более высокое, хотя большая их часть и стекает в резуль-

тате изрезанности рельефа. Тем не менее в результате наличия пролювиальных образований, а также вследствие выветрелости и трещиноватости горных пород часть атмосферных осадков инфильтруется, что и обусловливает выход по склонам горных рек многочисленных родников, нередко в десятки и сотни литров в секунду и больше. Режим подобных родников резко изменяется по сезонам, а также по годам, в зависимости от количества и характера выпадающих осадков.

Горные реки выносят в прилегающие равнины огромное количество продуктов разрушения горных пород, которые отлагаются в виде конусов выносов. Состоят последние из грубообломочного материала. Конуса выносов отдельных рек в предгорных районах сливаются, образуя наклонные предгорные равнины, так называемые а д ы р ы, песчано-галечниковые отложения которых включают мощные потоки грунтовых вод, обычно маломинерализованных. Это и позволяет широко использовать грунтовые воды предгорных наклонных равнин для целей водоснабжения и орошения.

Г р у н т о в ы е в о д ы м о р с к и х п о б е р е ж и й. Пологие морские побережья, как правило, состоят из песчаных образований, часто представленными дюнами. В области развития дюн зеркало грунтовых вод образует волнистую поверхность, в сглаженном виде повторяющую дюнную поверхность. Грунтовые воды в дюнных песках пресные, но на некоторой глубине пресная вода сменяется минерализованной, морской. Пресные воды Балтийского побережья распространены на широких пространствах и имеют большое практическое значение. На пологих побережьях Черного и Каспийского морей воды засоленные; только на побережье Черного моря в области развития песчаных бугров, так называемых кучугуров (в устье р. Днепра), в небольших количествах встречаются пресные воды, ниже которых залегают соленые морские.

§ 29. Режим грунтовых вод

Условия залегания, питания и движения грунтовых вод обусловливают значительное изменение во времени положения их зеркала, мощности водоносных горизонтов, физических свойств, химического и газового состава, скорости движения, количества и пр. Поскольку грунтовые воды в жизни человека играют большую роль, указанные изменения грунтовых вод издавна изучались для установления закономерностей, обусловливающих эти изменения. На режим грунтовых вод в основном влияют условия питания (в свою очередь зависящие от климата, рельефа, растительности, литологии пород и т. п.) и взаимосвязь с поверхностными водотоками и водоемами (см. рис. 21 и 22), уровень воды в которых также подвержен изменениям во времени. Наибольшее практическое значение имеет изучение режима уровней и расходов подземных вод.

Наблюдения за режимом подземных вод ведут геологические станции; в зависимости от объема проводимых работ и соответственно

степени их оснащенности приборами и аппаратурой станции подразделяются на классы (первый, второй и третий). Целями исследований режима подземных вод являются вскрытие объективных закономерностей, глубокое изучение процессов, обусловливающих формирование подземных вод определенного облика. Как указывалось, процесс формирования подземных вод представляет собой совокупность чрезвычайно сложных физических, физико-химических, химических и биологических процессов, протекающих как одновременно, так и последовательно под влиянием ряда естественноисторических факторов, а также в результате инженерной деятельности человека. Следовательно, задачи по изучению режима подземных вод весьма ответственны и имеют большое народнохозяйственное значение, особенно в связи с тем, что во многих случаях процессами формирования подземных вод приходится управлять, искусственно изменять эти процессы в нужном для человека направлении, устраивая так называемые «фабрики грунтовых вод».

ГЛАВА IX

АРТЕЗИАНСКИЕ ВОДЫ

§ 30. Условия залегания

Артезианские воды — это межпластовые подземные напорные воды, заключенные в более или менее глубоких водоносных горизонтах, залегающих между водонепроницаемыми пластами в пределах сравнительно крупных геологических структур, и находящиеся под гидростатическим давлением. При вскрытии скважинами артезианские воды поднимаются выше кровли водоносного пласта и, если отметка напорного уровня превышает отметку поверхности земли в данном пункте, вода будет изливаться выше поверхности земли (рис. 24). Геологическими структурами, способствующими образованию артезианских вод, являются синеклизы, мульды, моноклинали и т. п. Гидростатическое давление тем больше, чем ниже располагается область стока относительно области питания.

Геологические структуры, к которым приурочены артезианские водоносные горизонты, называются артезианскими бассейнами.

Область питания артезианских вод — площадь выхода водопроницаемых пород, участвующих в строении артезианского бассейна, на дневную поверхность. Располагается эта область на наиболее высоких отметках, нередко на расстоянии свыше 1000 *км* от областей напора и разгрузки.

Область напора — основная площадь распространения артезианского бассейна, в пределах которой уровень подземных вод залегает выше кровли водоносных горизонтов и комплексов.

Область разгрузки — область выхода напорных вод на поверхность в виде восходящих источников (концентрированные струи, рассеянные линейные выходы и т. п.). Часть области

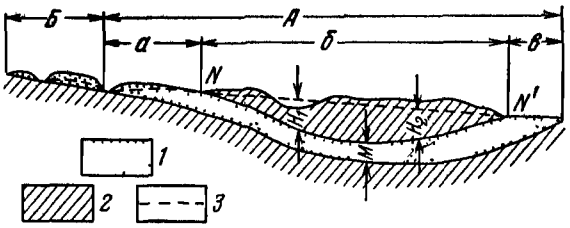


Рис. 24. Схема артезианского бассейна (по А. М. Овчинникову)

1 — водоносный пласт; *2* — водоупорные породы; *3* — пьезометрический уровень воды; *А* — пределы распространения напорных вод; *а* — область питания, *б* — область напора; *в* — область разгрузки; *Б* — пределы распространения грунтовых вод; H_1 — напорный уровень выше поверхности земли; H_2 — напорный уровень ниже поверхности земли; $N—N'$ — пьезометрическая поверхность; *М* — мощность напорного водоносного горизонта

разгрузки явно не обнаруживается и устанавливается на основе общегеологического изучения площади распространения артезианского бассейна.

При вскрытии скважиной водоносного пласта с напорной водой уровень воды в ней поднимается выше водоупорной кровли водоносного горизонта; плоскость $N—N'$, определяющая положение напорного уровня в водоносном пласте (см. рис. 24), называется пьезометрическим уровнем. Высота подъема воды H выше водоупорной кровли именуется напором.

Для характеристики артезианских водоносных горизонтов составляют следующие карты: пьезоизогипс, или гидроизопьез, которая показывает в изолиниях абсолютные (реже относительные) отметки пьезометрического уровня, и изогипс водоупорной кровли. Строят подобные карты по методике, принятой в геодезии. Обычно карты поверхности земли в горизонталях, пьезоизогипс и изогипс водоупорной кровли водоносного горизонта совмещают (рис. 25), что дает возможность легко решать ряд практических задач: определять глубину залегания артезианского водоносного горизонта в каждом пункте, величину напора, возможность фонтанирования в данном пункте, направление движения напорных вод, гидравлический уклон и др.

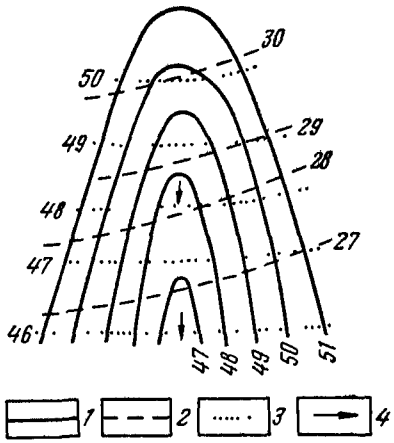


Рис. 25. Схема карты пьезоизогипс

1 — горизонтали поверхности земли; *2* — пьезоизогипсы, *3* — горизонтали кровли водоносного горизонта; *4* — направление движения напорных вод

Режим артезианских вод в естественных условиях характеризуется большим постоянством по сравнению с режимом безнапорных вод. Сильное влияние на режим напорных вод оказывает деятельность человека. Из недр Земли ежегодно извлекаются огромные массы подземных вод для нужд питьевого, хозяйственного и технического водоснабжения, лечебных целей, ирригации, добычи химического сырья, а также при искусственном водопонижении в связи с производством строительных, горных и других работ. Длительные и мощные откачки подземных вод существенным образом влияют на их режим. Во многих крупных городах мира с помощью буровых скважин в течение десятков лет эксплуатируются артезианские воды, в результате чего их уровни значительно снизились; в Москве — на 40—90 *м*, в Ленинграде — на 50 *м*, в Киеве — на 63 *м*, в Лондоне — более чем на 100 *м*, в Париже — более чем на 120 *м*. Понижение уровней наблюдается на площади многих сотен квадратных километров. В отдельных угольных бассейнах глубина осушения достигает 1000 *м* и более, а площади осушения составляют многие тысячи квадратных километров. Снижение уровней обычно влечет за собой изменение физических свойств, химического, газового и бактериального состава подземных вод, исчезновение родников, осушение рек и озер, изменение состояния и свойств пород и многие другие процессы и явления.

В артезианских бассейнах, как правило, прослеживается гидродинамическая и гидрохимическая зональность.

Н. И. Толстихин, И. К. Зайцев и М. С. Гуревич выделяют четыре гидрохимические зоны: 1) зону пресных вод с минерализацией менее 1 *г/л* гидрокарбонатного состава, приуроченную к участкам интенсивного водообмена; 2) зону солоноватых вод с минерализацией от 1 до 10 *г/л* гидрокарбонатного сульфатного и сульфатного хлоридного состава, приуроченную к зоне затрудненного водообмена; 3) зону соленых вод с минерализацией от 10 до 50 *г/л*; 4) зону рассолов с минерализацией свыше 50 *г/л*. Зоны соленых вод и рассолов включают воды хлоридного натриевого или кальциевого типа, залегают они в зоне весьма затрудненного водообмена.

По площади артезианские бассейны, по А. М. Овчинникову, подразделяются на крупные (свыше 100 000 *км*^{2}), средние (100 000—10 000 *км*^{2}) и малые (менее 10 000 *км*^{2}), представляющие собой, как правило, «наложенные» на крупные и средние.

§ 31. Главнейшие артезианские бассейны СССР

Артезианские бассейны выделяются на основании тектонических, стратиграфических и литологических признаков. В пределах СССР имеются многочисленные артезианские бассейны, воды которых в огромных количествах используются на самые различные нужды, в основном для питьевого водоснабжения. По тектоническим особенностям артезианские бассейны делятся на бассейны платформенного типа, массивов и складчатых

областей (межгорных впадин). Бассейны платформенного типа приурочены к крупным тектоническим понижениям — синеклизам и моноклиналям, распространенным на огромных пространствах и всегда содержащим несколько водоносных горизонтов, расположенных поэтажно. Артезианские бассейны складчатых областей занимают небольшие площади, располагаясь в предгорьях или межгорных впадинах, и образуют малые и средние артезианские бассейны. Артезианские бассейны массивов занимают промежуточное положение. Наиболее распространены артезианские бассейны платформ и затем межгорных впадин. Имеется много схем районирования артезианских вод СССР [45]; на рис. 26 показана карта гидрогеологического районирования, составленная Г. Н. Каменским, Н. И. Толстихиным и М. М. Толстихиной [14].

Артезианские бассейны платформенного типа. *Прибалтийский артезианский бассейн* расположен в Ленинградской области и в Прибалтийских республиках. В кембрийских отложениях водоносными являются пески и песчаники. Скважины из них в Ленинграде дают самоизливающуюся солоноватую воду. В ордовикских отложениях водоносны известняки. Вблизи области питания вода в них пресная, скважины часто фонтанируют, они широко используются для водоснабжения многих городов Прибалтики. Одновременно напорные воды ордовикских известняков вносят значительные осложнения при разработке горючих сланцев на Гдовском и Эстонском месторождениях.

Силурийский водоносный горизонт приурочен к трещиноватым и закарстованным известнякам мощностью до 100 *м* и более. В северной и южной частях бассейна подземные воды силурийского водоносного горизонта пресные, в центральной — слегка минерализованные (2—5 *г/л*). В среднем и верхнем девоне выделяются три водоносных горизонта. В северной и южной частях бассейна все они включают пресные воды, а в центральной — солоноватые. Водоносный горизонт в карбонатных породах верхней перми содержит пресные воды и имеет большое практическое значение в западной части Литовской ССР. Водоносные горизонты, приуроченные к юрским и верхнемеловым отложениям, содержат в большинстве пресные воды, наиболее водообильны трещиноватые породы верхнего мела. В отдельных пунктах расход источников, вытекающих из названных отложений, достигает 60—70 *л/сек* и более.

На территории Прибалтийского артезианского бассейна широко распространены напорные воды, приуроченные к подморенным и межморенным отложениям, мощность которых местами достигает свыше 100 *м*. Они содержат большие запасы пресных вод, широко используемых для водоснабжения крупных населенных пунктов и городов.

Московский артезианский бассейн распространен на площади многих сотен тысяч квадратных километров. Он занимает юго-западную часть Валдайско-Тиманской чашеобразной синеклизы, северная и северо-восточная части которой в гидрогеологическом отношении

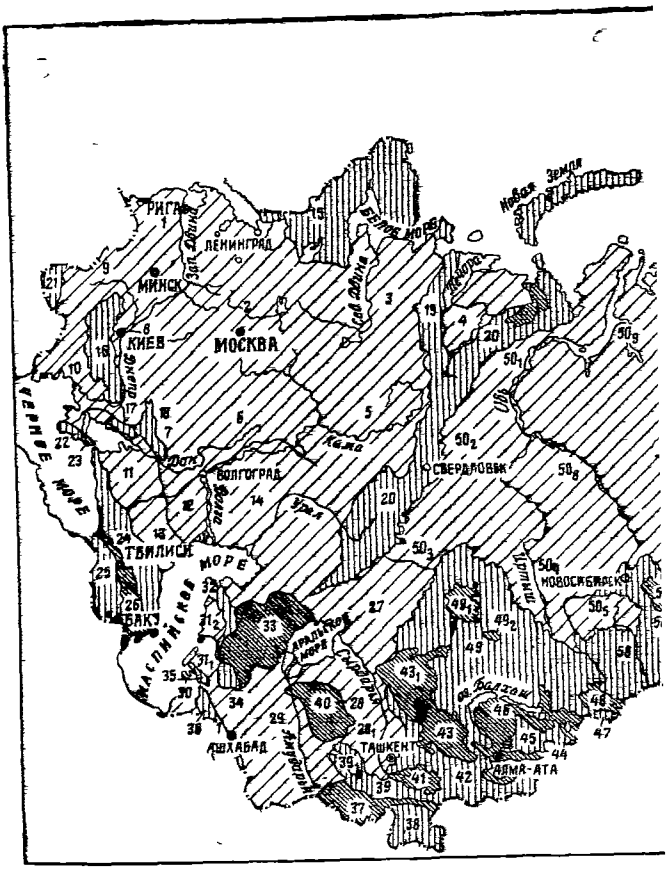


Рис. 26. Карта гидрогеологического районирования терр

М. М.

1 — *артезианские бассейны платформ*; *2* — гидрогеологические массивы и складчатые области; *3* — артезианские бассейны складчатых областей

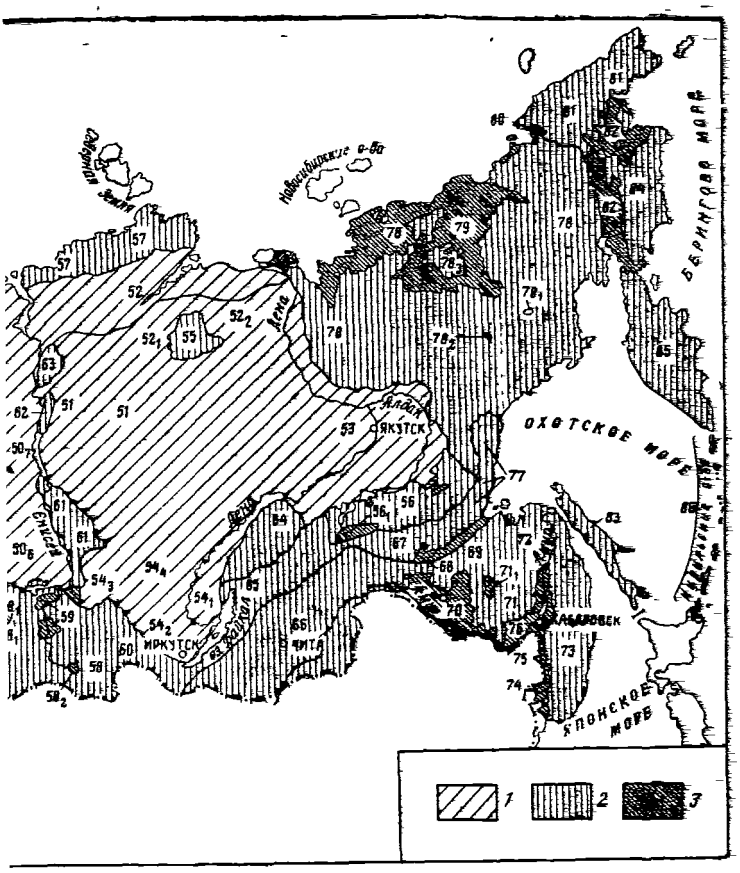
Европейская часть СССР, Урал и Кавказ

Артезианские бассейны: *1* — Прибалтийский бассейн. *Артезианские бассейны центра, востока и севера Русской платформы* (Русский артезианский сложный бассейн): *2* — Московский; *3* — Северо-Двинский, *4* — Печорская группа артезианских бассейнов (Печорский, Усинский, Коротаихский), *5* — Волго-Каспийский; *6* — Сурско-Хоперский. *Днепровско-Донецкий сложный бассейн*: *7* — Донецко-Донской, *8* — Днепровский; *9* — Львовский; *10* — Причерноморский; *11* — Приазовский (*12* — Ергенинский гидрогеологический район); *13* — Терско-Кумский; *14* — Прикаспийский

Складчатые области и гидрогеологические массивы: *15* — Балтийский массив. *Украинская складчатая область*: *16* — Подольская складчатая область; *17* — Азовский массив; *18* — Донецкая складчатая область; *19* — Тиманская складчатая область; *20*— Уральская складчатая область; *21* — Карпатская складчатая область. *Крымско-Кавказская сложная складчатая область*: *22* — Крымская складчатая область; *23* — Керченско-Таманская система малых артезианских бассейнов; *24* — складчатая область Большого Кавказа (Большекавказская); *25* — складчатая область Малого Кавказа (Малокавказская); *26* — Рионо-Куринская система малых артезианских бассейнов

Средняя Азия и Восточный Казахстан

Артезианские бассейны. *Группа Приаральских артезианских бассейнов*: *27* — Тургайский; *28* — Сырдарьинский (*28*$_1$ — Приташкентский артезианский бассейн второго порядка); *29* — Амударьинский (Каранумский); *30* — Закаспийский (Западно-Туркменский); *31* — Красноводско-Мангышлакский (бассейны второго порядка: *31* — Красноводский; *31* — Мангышлакский). **Складчатые области и гидрогеологические массивы**: *32* — Мангышлакская складчатая область; *33* — Устюртская система малых артезианских бассейнов; *34* — Туаркырская складчатая область; *35* — Балханская складчатая область; *36* — Копет-Дагская складчатая область (*36* — гидрогеологический район горы Мал. Балхан); *37* — Южно-Таджикская система малых артезианских бассейнов; *38* — Памирский бассейн; *39* — Алайский массив (*39*$_1$ — Зеравшанский межгорный артезианский бассейн); *40*—Кызылкумская система малых артезианских бассейнов и мульд с выступами палеозойского фундамента на поверхность; *41* — Ферганский артезианский бассейн; *42* — Тянь-Шаньский массив; *43* — Чуйский артезианский бассейн (43 — Сарысуйский артезианский бассейн); *44* — Илийский артезианский бассейн; *45* — Джунгарский гидрогеологический массив; *46* — Алакуль-Балхашский артезиан-



итории СССР. Составили Г. Н. Каменский, Н. И. Толстихин, Толстихина

ский бассейн; *47* — Тарбагатайская складчатая область; *48* — Зайсанский артезианский бассейн; *49* — Северо-Казахстанская складчатая область (49_1 — Акмолинский Тенгиз-Кургальджинский артезианский бассейн; 49_2 — Карагандинский артезианский бассейн)

Сибирь и Дальний Восток

Артезианские бассейны. *Западно-Сибирский артезианский бассейн:* 50_1 — северо-западное крыло; 50_2 — западное крыло; 50_3 — юго-западная часть — Тобольский артезианский бассейн; 50_4 — Иртышский артезианский бассейн; 50_5 — Кулундино-Барнаульский; 50_6 — Чулымский; 50_7 — восточное (енисейское) крыло; 50_8 — Обский артезианский бассейн — центральная часть Западно-Сибирского; 50_9 — Приказарский. *Восточно-Сибирская группа артезианских бассейнов: 51* — Тунгусский; *52* — Хатангский (гидрогеологические районы: 52_1 — Нижне-Котуйский, 52_2 — Нижне-Оленекский); *53* — Якутский; *54* — Ангаро-Ленский (54_1 — Верхне-Ленский; 52_2 — Иркутский; 54_3 — Канский; 54_4 — Ангарский) Складчатые области и гидрогеологические массивы, межгорные и другие артезианские бассейны: *55* — Анабарский массив; *56* — Алданский массив (56_1 — Чульманский артезианский бассейн); *57* — Таймырская складчатая область; *58* — Саяно-Алтайская складчатая область (58_1 — Кузнецкий артезианский бассейн; 58_2 — Тувинский артезианский бассейн); *59* — Минусинские бассейны. *Саяно-Енисейская складчатая область: 60* — Восточно-Саянский массив; *61* — Енисейский массив; *62* — Туруханская складчатая область; *63* — Ханчайская складчатая область

Восточно-Сибирская сложная складчатая область: 64 — Патомо-Витимский массив; *65* — Байкало-Черская складчатая область; *66* — Даурская складчатая область; *67* — Становой гидрогеологический массив; *68* — Верхне-Зейский артезианский бассейн; *69* — Джагдынская складчатая область; *70* — Нижне-Зейский артезианский бассейн; *71* — Буреинская складчатая область (*71* — Буреинский межгорный артезианский бассейн); *72* — Амгунь-Амурская складчатая область; *73* — Сихотэ-Алиньская складчатая область; *74* — Приханкайский артезианский бассейн; *75* — Уссурийский бассейн (в основном грунтовых вод); *76* — Сунгари-Амурский бассейн (в основном грунтовых вод); *77* — Джугджурская складчатая область; *78* — Верхояно-Колымская сложная складчатая область (78_1 — Эльгенский артезианский бассейн; 78_2 — Аркагалинский артезианский бассейн; 78_3 — Алазейский гидрогеологический массив второго порядка); *79* — Яно-Колымский артезианский бассейн; *80* — Чаунский артезианский бассейн; *81* — Чукотская складчатая область; *82* — Пенжинско-Анадырская система артезианских бассейнов; *83* — Сахалинская складчатая область; *84* — Корякская складчатая область; *85* — Камчатская складчатая область; *86* — Курильская складчатая область

изучены еще недостаточно. Подземные воды бассейна используются для водоснабжения многих населенных пунктов и промышленных предприятий в Московской, Калининской, Смоленской, Калужской, Тульской и других областях.

Водоносными являются отложения кембрия, ордовика, девона и карбона (главным образом), а на востоке — перми.

В известняках девона воды минерализованы, местами имеют лечебное значение (курорты Краинка Калужской области, Старая Русса, Московская минеральная вода).

В отложениях карбона водоносны известняки и доломиты. Напорные воды в известняках маломинерализованные, гидрокарбонатного кальциевого типа. Скважины нередко фонтанируют. Производительность многих скважин достигает десятков и сотен кубических метров в час.

Напорные воды в девонских и каменноугольных известняках, а также в песчаных отложениях угленосной толщи вносят значительные осложнения при ведении горных работ в Подмосковном угольном бассейне.

Днепровско-Донецкий артезианский бассейн (Украинская мульда) представляет собой корытообразный прогиб, вытянутый с северо-запада на юго-восток. Располагается этот бассейн в пределах южных областей Белорусской ССР, на значительной площади Украинской ССР и в некоторых областях РСФСР. Общая площадь бассейна равна примерно 300—350 тыс. *км*^{2}. Водоносные горизонты и комплексы залегают в верхнепротерозойских и нижнекембрийских отложениях, породах среднего и верхнего девона, каменноугольных, триасовых, юрских, верхнемеловых и третичных отложениях. В центральной части бассейна во всех отложениях глубже юрских содержатся минерализованные воды, содержание солей в которых увеличивается с глубиной, достигая свыше 100 *г/л*, и представляют собой крепкие рассолы. По склонам мульды пресная вода содержится в отложениях всех возрастов.

Наибольшее практическое значение имеют напорные маломинерализованные воды, приуроченные к отложениям юрского, мелового и нижнетретичного возраста. Наиболее глубоко залегающим водоносным горизонтом в осевой части мульды, содержащим маломинерализованные воды, является юрский, приуроченный к разнозернистым кварцевым пескам. Дебит скважин достигает десятков и сотен кубометров в час.

Выше залегает водоносный горизонт, приуроченный к крупно- и разнозернистым, нередко мелкозернистым пескам сеномана. Глубина скважин изменяется от нескольких десятков метров по окраинам мульды до нескольких сотен метров в ее центре. Качество воды хорошее. Над песками сеномана залегает мощная толща трещиноватого мела сенона и турона мощностью в центре мульды до 500 *м*. Производительность скважин различается в зависимости от степени трещиноватости мела в каждом конкретном пункте.

Выше залегает водоносный горизонт с напорной водой, приуроченный к разнозернистым пескам бучакского яруса и перекрытый глинами и мергелями киевского яруса. Воды этого горизонта в северо-западной (приднепровской) части мульды отличаются хорошим качеством, нередко скважины фонтанируют.

Водоносный горизонт в глауконитовых песках и песчаниках харьковского яруса имеет относительно меньшую площадь распространения, он расположен только в западной части мульды. Скважины местами фонтанируют (Лубны, Полтава).

Вышележащие пески полтавского яруса не имеют сплошного распространения. Приуроченные к этим пескам подземные воды имеют свободное зеркало и относятся к грунтовым.

Подземные воды Днепровско-Донецкого артезианского бассейна широко используются для водоснабжения многих населенных пунктов и промышленных предприятий (Киев, Харьков, Чернигов, Бахмач, Лубны, Нежин, Миргород, Полтава и др.).

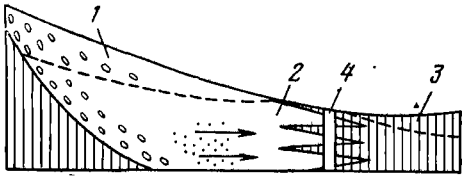


Рис. 27. Схема залегания напорных вод в предгорной долине

1 — область поглощения; *2—3* — области выклинивания и образования напоров; *4* — колодец

Артезианские бассейны складчатых областей. Напорные воды в горноскладчатых областях образуются в районе предгорий и межгорных долинах. Напорность вод здесь обусловлена тем, что песчано-гравелистые образования предгорных шлейфов по мере удаления от гор перекрываются более глинистыми отложениями (рис. 27). Образующиеся подобным путем артезианские бассейны, как правило, малые и средние, большого распространения не имеют. Они распространены на площади предгорных и междугорных равнин в Закавказье, Средней Азии и других районах. Воды их широко используются для водоснабжения населенных пунктов (Баку, Алма-Ата и др.).

Описание артезианских бассейнов СССР приводится в многочисленной учебной литературе [14] и в монографии «Гидрогеология СССР».

Артезианские воды имеют огромное значение в народном хозяйстве СССР. Они используются для водоснабжения многих городов, промышленных предприятий, совхозов, железнодорожных станций и других объектов, из них извлекаются бром, йод и другие ценные компоненты, высокотемпературные артезианские воды используются для теплофикации городов, отопления парников и оранжерей, что позволяет в суровых условиях Камчатки, Исландии и других подобных местах в течение круглого года выращивать овощи и фрукты. Общеизвестно употребление артезианских вод в бальнеологических целях на курортах (Кисловодск, Ессентуки, Цхалтубо и др.).

ГЛАВА X

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ В ТРЕЩИНОВАТЫХ И ЗАКАРСТОВАННЫХ ПОРОДАХ

§ 32. Трещинные воды

Обычно скальные горные породы (магматические, метаморфические и осадочные) разбиты системами трещин, происхождение которых, размеры, форма и положение в пространстве самые различные.

В верхней части земной коры под действием выветривания в скальных породах образуются трещины выветривания, иногда значительных размеров. Глубина этих трещин определяется мощностью наиболее интенсивной зоны выветривания и, как правило, не превышает нескольких десятков метров, достигая иногда глубины 100 *м* и более. В зависимости от физико-географических и геологических условий, а также от состава скальных пород в трещинах выветривания может иметься то или иное количество подземных вод — безнапорных или напорных.

Литогенетические трещины, развивающиеся в эффузивных породах, нередко имеют значительные размеры и включают мощные потоки грунтовых вод. В Грузии и Армении трещиноватые лавы четвертичного возраста обычно выполняют неровности древнего рельефа. Коренные, более древние породы являются водоупорами, что создает благоприятные условия для образования бассейнов и потоков грунтовых вод, выходящих в виде мощных нисходящих источников в местах, где лавовые потоки вскрываются местной эрозионной сетью, обычно глубоко врезанной; такие источники широко используются для водоснабжения.

Пластово-трещинные воды приурочены к трещинам скальных осадочных пород (песчаникам, известнякам и т. п.), залегающим между водоупорными породами, которыми являются аргиллиты или глинистые сланцы. Пластово-трещинные воды широко распространены на месторождениях каменных углей Донецкого, Кузнецкого, Карагандинского и других бассейнов, а также в обширных артезианских бассейнах (Подмосковном, Днепровско-Донецкой впадине и др.).

Тектонические трещины являются путями циркуляции подземных вод. Сбросы и взбросы нередко сопровождаются брекчиями трения в зонах раздавленных пород, по которым подземные воды циркулируют наиболее свободно.

Напорные воды в тектонических трещинах земной коры называются жильными водами; они характеризуются глубокой циркуляцией по породам различного состава и возраста.

Напорные воды в трещинах отличаются от напорных пластовых вод по условиям залегания; напор обусловлен гидростатическим давлением в сообщающихся трещинах.

Нередко напор трещинных вод обусловливается давлением газа, поступающего из более глубоких зон земной коры, а также давлением водяных паров; последний случай имеет место тогда, когда вода с температурой более 100° С вырывается из глубин на поверхность (Камчатка, Исландия, Новая Зеландия и другие места). Подобные выходы трещинных горячих вод и газа называются г е й з е р а м и.

К глубоким трещинам в земной коре приурочены многие минеральные и термальные источники, часто имеющие лечебное значение. Воды подобных источников иногда выносят на поверхность земли в растворенном виде элементы, не встречающиеся в подземных водах, циркулирующих в верхних зонах земной коры.

Трещинные воды по связи их с определенными типами трещин и гидравлическим свойствам подразделяются на трещинные грунтовые, приуроченные к трещинам выветривания и литогенетическим, трещинно-пластовые и трещинно-жильные напорные воды.

В пределах СССР трещинные воды широко развиты на площади Балтийского и Украинского кристаллических щитов, на Карпатах, горных районах Кавказа, Закавказья, на Урале, в Средней Азии и других местах, где и используются для водоснабжения и в лечебных целях.

§ 33. Карстовые воды

Под карстом понимают совокупность явлений, связанных с деятельностью подземных вод и выражающихся в растворении, выщелачивании и механическом размыве горных пород (известняков, доломитов, гипса, ангидритов и солей) и образовании в них пустот (каналов, пещер и т. п.). Карст связан в основном с региональными условиями — климатом, тектоникой и морфологией местности, в которой распространены породы, способные растворяться и выщелачиваться в воде.

Известняки, доломиты, гипсы и другие породы в большинстве случаев водопроницаемы только по трещинам. Система трещин регионального и локального типов поражает раскарстованные породы на всю их мощность. Следовательно, региональная и локальная трещиноватость играет наиболее существенную роль в развитии карста. При прочих равных условиях количество растворенной породы будет зависеть от количества воды, протекающей по трещинам, т. е. от условий питания и фильтрации. Условия питания водой зависят от климата района, обнаженности пород, способных к карстообразованию, условий стока атмосферных вод и условий поступления воды в породы. Условия фильтрации зависят от трещиноватости пород и градиентов фильтрации. Наибольшая трещиноватость наблюдается в тектонически нарушенных зонах; поэтому тектоника местности имеет существенное значение в процессах карстообразования.

Подземные формы карста представлены различными по размерам вертикальными и горизонтальными каналами, галереями и пещерами. На поверхности в карстовых районах образуются воронки

различных размеров, карстовые колодцы — крупные вертикальные трещины округлой формы, карстовые овраги, полья — крупные замкнутые карстовые депрессии современного рельефа.

Карстовые области обычно бедны поверхностными водотоками, так как многие ручьи и реки уходят в подземные пустоты. В карстовых районах поглощение атмосферных осадков происходит очень быстро через зияющие трещины и воронки, куда вода устремляется с большой скоростью; образующиеся подобным путем подземные воды называются *инфлюационными* (проваливающимися).

Характерными особенностями режима карстовых вод являются: тесная и активная связь с атмосферными осадками; большая амплитуда колебаний уровней воды и дебитов источников, вплоть до полного иссякания; легкая возможность загрязнения, в том числе органическими веществами.

Состав карстующихся пород, условия движения подземных вод по раскарстованным породам, химические, биохимические и другие процессы определяют химический состав и минерализацию карстовых вод. Менее минерализованные воды характерны для известнякового карста, более минерализованные — для гипсового и наиболее минерализованные — для соляного карста.

Проведение выработок в закарстованных и трещиноватых породах требует особого внимания во избежание непредвиденных прорывов подземных вод. Иногда гидрогеологические условия некоторых месторождений в карстовых районах таковы, что исключают возможность разработки полезного ископаемого ниже уровня подземных вод. Например, разработка флюсовых известняков и доломитов на Щелковских карьерах под Москвой производится только выше уровня подземных вод, циркулирующих по разнообразным трещинам и пустотам в известняках.

В практике строительства и эксплуатации карьеров известны случаи прорыва карстовых вод даже при условии, когда выработки и не вскрывают непосредственно раскарстованные породы. Именно в подобных условиях произошел прорыв в 1945 г. напорных вод из девонских известняков на Богословском карьере, где карстовые воды были взаимосвязаны с трещинными, циркулировавшими по трещинам в вышележащих осадочных песчано-глинистых породах.

На месторождениях бокситов, залегающих в закарстованных и тектонически нарушенных известняках, притоки воды в горные выработки некоторых шахт достигали 7000—8000 $м^3/ч$.

На территории СССР карстовые воды широко распространены. Изучены они наиболее детально под Ленинградом и в Прибалтике, в Тульской, Московской и других центральных областях, на Карпатах, в Крыму, на Кавказе, на Уфимском плато, на западном склоне Урала, в Средней Азии, на Алтае, в бассейне р. Лены и других районах.

В связи с широким распространением карстовые воды имеют большое народнохозяйственное значение. Они используются для водоснабжения населения и промышленных предприятий. По западному

склону Урала, в Южном Казахстане, в Восточной Сибири и других местах имеются водозаборы, эксплуатирующие карстовые воды, суммарный дебит которых достигает 160—200 тыс. *м*³/*сутки*; средний удельный дебит отдельных скважин нередко составляет 20—40 тыс. *м*³/*сутки* (данные Н. И. Плотникова).

При ведении горных работ подземным и открытым способами в районах распространения трещинных, особенно раскарстованных пород, необходим детальный, исчерпывающий анализ существующих гидрогеологических условий месторождения в целях учета их при проектировании горных работ и разработке месторождения.

ГЛАВА XI

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ЗОНЫ РАЗВИТИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

§ 34. Общие сведения

Многолетнемерзлые породы представляют собой толщу горных пород, имеющих отрицательную температуру в течение неопределенно долгого времени, что обусловливает наличие в породах льда, цементирующего частицы пород. Площадь распространения многолетнемерзлых пород в СССР по последним данным [29] 49,7% всей территории страны. На земном шаре площадь многолетнемерзлых пород составляет до 24% всей площади суши.

Изучение многолетнемерзлых пород в нашей стране и условий строительства различных объектов в районах их распространения имеет огромное народнохозяйственное значение. Здесь выявлены многочисленные месторождения разнообразных полезных ископаемых — угля, железных руд, алмазов, олова, вольфрама, никеля, золота, нефти, газа и многих других, что вызвало рост в этих районах горнодобывающей промышленности и развитие других отраслей народного хозяйства и связанных с ними жилищного и дорожного строительства.

Мощность многолетнемерзлой толщи пород зависит от очень сложной взаимосвязи многих факторов: температурного режима атмосферы, почвы и литосферы; характера рельефа; растительности; толщины снежного покрова; наличия поверхностных водоемов и водотоков; циркуляции подземных вод; геохимических процессов, протекающих в литосфере; производственной деятельности человека. Например, различие годовой температуры почвы на 1° С обусловливает изменение мощности многолетнемерзлой толщи на 30—60 *м*. Мощность мерзлых пород колеблется в пределах от нескольких метров до 600—800 *м*, а в высокогорных районах превышает даже 1000 *м*.

На крайнем севере и северо-востоке многолетнемерзлые породы распространены повсеместно. Это зона *сплошного распространения многолетнемерзлых пород и ископаемого*, или погребенного, *льда**. Несколько южнее располагается зона, где мерзлые породы местами отсутствуют и наблюдаются *талики*; это *зона многолетнемерзлых пород с островами таликов*. К этой зоне с юга примыкают области, где многолетнемерзлые породы распространяются только местами на общем фоне талых пород; это *зона островного распространения многолетнемерзлых пород и перелетков* (перелетками называются небольшие линзы мерзлых пород, образующихся после суровых зим и сохраняющихся в течение двух-трех лет, иногда больше).

Верхний слой земной коры в районах распространения многолетнемерзлых пород в весенне-летний период оттаивает, а осенью и зимой замерзает. Если этот слой при промерзании зимой не сливается с толщей промороженных пород, то его называют *сезонно-промерзающим*, а если сливается — *сезонно-оттаивающим*; в геологической литературе его называют *деятельным слоем*. Мощность деятельного слоя в разных местах различна и зависит от климатических условий, рельефа, характера почвенного слоя, наличия растительности и ее вида, геологического строения, физических и тепловых свойств горных пород. В зависимости от сочетания указанных факторов мощность деятельного слоя изменяется от долей метра до 6—8 *м*. На крутых склонах, сложенных коренными породами, где отсутствует снежный покров, максимальная глубина промерзания (и оттаивания) в зависимости от степени трещиноватости, выветрелости и влажности может достигать более 10 *м*. В тонкодисперсных грунтах — суглинках и глинах — глубина сезонного промерзания и оттаивания редко превышает 2—3 *м*.

Опыт строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов свидетельствует, что недоучет режима деятельного слоя приводит к самым печальным последствиям; дороги, аэродромы, здания и другие сооружения деформируются и даже разрушаются. Поэтому установление мощности деятельного слоя и его температурного режима имеет существенное значение и является одной из основных задач при проведении инженерных изысканий.

По глубине нередко зимнее промерзание не достигает многолетнемерзлой толщи пород, причем деятельный слой, образовавшийся за период летнего оттаивания, не смыкается с промороженным. Это *несливающаяся* мерзлота. Иногда на значительную глубину наблюдается чередование талых и многолетнемерзлых прослоев грунта. Подобное залегание называется *слоистой*, или *прерывистой, мерзлотой*. Причины образования

* Исследования последних лет показали, что и в районе сплошного развития многолетнемерзлых пород встречаются талики (под озерами, по долинам рек и в других местах).

слоистой мерзлоты разнообразны и полностью еще не изучены. При устройстве дорожных выемок и котлованов в районах распространения слоистой мерзлоты могут создаваться тяжелые условия при строительстве выемок и в период их эксплуатации, так как прослои талого грунта способствуют проявлению оползневых и других процессов, деформирующих откосы выемок и котлованов. Чтобы не допустить подобных отрицательных явлений, необходимо заранее осуществлять соответствующие профилактические мероприятия.

Ниже деятельного слоя залегает горизонт многолетнемерзлых горных пород, в пределах которого происходят сезонные колебания отрицательных температур. Мощность данного горизонта изменяется от 3 до 15 и даже 25—30 *м*. Ниже слоя с сезонноменяющейся температурой залегают породы с постоянной отрицательной температурой. На севере Таймырского полуострова на глубине 10—15 *м* среднемноголетняя температура составляет минус 13—15° С, в районе Оймякона — около 10—12 ниже нуля, в районе Якутска на глубине 10—12 *м* — около минус 4° С, в Чите — около 2° С ниже нуля.

§ 35. Основные типы подземных вод области многолетнемерзлых пород

Подземные воды области многолетнемерзлых пород находятся во взаимодействии с подземными водами примыкающих к ней областей. Многолетнемерзлые породы, как указывалось, прерывисты, пронизаны таликами на всей площади их распространения и поэтому не представляют собой преграды, полностью отделяющей подземные воды от поверхностных.

Подземные воды многолетнемерзлых пород, по Н. И. Толстихину, подразделяются на три категории: надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные.

Надмерзлотные воды, залегающие над зоной мерзлых пород, в свою очередь подразделяются на воды деятельного слоя и воды многолетних надмерзлотных таликов.

Надмерзлотные воды деятельного слоя залегают на толще многолетнемерзлых пород, которые являются для этих вод водоупорным ложем. Они обычно распространены в пониженных формах рельефа и на широких плоских водораздельных пространствах, реже встречаются на склонах. Эти воды связаны с водопроницаемыми пористыми и трещинными породами различного происхождения и возраста, слагающими деятельный слой. В подавляющем большинстве случаев надмерзлотные воды залегают в четвертичных отложениях. Характерной особенностью этих вод является сезонная смена жидкой и твердой фаз. На севере длительность существования жидкой фазы определяется двумя-тремя месяцами летне-осеннего периода, по направлению к югу она увеличивается до шести месяцев и более. Питание вод деятельного слоя происходит за счет атмосферных осадков и частично за счет поверхностных водотоков.

Водообильность деятельного слоя зависит от водопроницаемости протаивающих пород. В ряде случаев этот водоносный горизонт может служить временным источником водоснабжения для небольших поселков. При устройстве тепляков над водозабором и снегозадержании длительность эксплуатации надмерзлотных вод деятельного слоя может быть значительно увеличена. Каптировать воды этого горизонта удобнее всего колодцем или галереей. Колодцы и галереи следует располагать у подножия склонов, на конусах выноса и вообще в таких местах, где по местным морфологическим признакам должны быть наибольшее оттаивание и приток воды.

Режим надмерзлотных вод деятельного слоя тесно связан с ходом сезонного промерзания и оттаивания. С момента начала промерзания деятельного слоя сверху в осеннее время свободная поверхность надмерзлотного горизонта переходит в поверхность под напором, и поэтому воды превращаются в напорные; напорность возрастает по мере увеличения промерзаемости грунта. В январе — марте промерзание деятельного слоя достигает максимума и горизонт сезонного промерзания сливается с многолетнемерзлой толщей.

В химическом отношении надмерзлотные воды сезонного слоя характеризуются малой минерализацией, значительным содержанием органических веществ и наличием гумусовых кислот. Температура их низкая и редко превышает 5° С.

Воды многолетних надмерзлотных таликов приурочены к многолетним, большей частью сквозным таликам. Надмерзлотные воды многолетних таликов существуют благодаря тепловому влиянию поверхностных вод. Залегают подобные талики под озерами и руслами рек. По долинам рек Охотско-Колымского и Чукотского нагорий и бассейна р. Лены выявлены и изучены сквозные талики площадью 0,3—1 *км*^{2}; подрусловый поток шириной до 200—400 *м* приурочен к аллювиальным отложениям. Воды сквозных таликов хорошего качества, общая минерализация их около 0,3 *г/л*, жесткость около 2,5 *мг·экв/л*, температура до глубины 50 *м* в течение года изменяется в пределах плюс 1—2° С. Дебит водозаборов, использующих воду в сквозных таликах при понижении 6—30 *м*, до 20 *л/сек*, иногда достигает 47 *л/сек*. Данные воды используются для питьевого и хозяйственно-технического водоснабжения.

В районах, где отсутствуют сквозные талики, а подмерзлотные воды излишне минерализованы, в конце лета через буровые скважины глубиной 210—273 *м* надмерзлотные воды подруслового талика нагнетаются в подмерзлотную толщу. В зимне-весенний период нагнетательные скважины работают как захватывающие, в результате чего и удовлетворяется потребность в воде предприятий и населения (данные П. Н. Калмыкова, журнал «Колыма», 1966, № 11). Через сквозные талики осуществляется взаимосвязь надмерзлотных, межмерзлотных и подмерзлотных вод.

М е ж м е р з л о т н ы е в о д ы. К межмерзлотным водам, по Н. И. Толстихину, следует отнести как жидкие воды, циркулирующие в массиве многолетнемерзлых пород, так и твердую фазу —

ископаемые льды и временно законсервированные мерзлые водоносные горизонты, некогда функционировавшие. Основными факторами, предохраняющими жидкие межмерзлотные воды от замерзания, являются их динамичность, а также иногда высокая минерализация. По характеру вмещающих воду горных пород выделяются следующие виды межмерзлотных вод: пластовые, карстовые и трещинно-жильные.

При проходке горных выработок в случае пересечения межмерзлотных вод притоки с течением времени могут увеличиваться, что обусловливается увеличением водоносных путей вследствие оттаивания межмерзлотных льдов (льда в трещинах, мерзлых водоносных горизонтах и т. п.).

В большинстве случаев межмерзлотные воды обладают напором. Область их питания не совпадает с областью распространения. Часто межмерзлотные воды имеют низкие температуры, вплоть до отрицательных, что наблюдается при их высокой минерализации.

Межмерзлотные воды в твердой фазе (залежи подземного льда в мерзлых породах) широко распространены в Центральной Якутии, на Ляховских и Новосибирских островах, в низовьях рек Лены, Яны и других районах северо-востока Сибири. Подземные льды в мерзлых породах залегают в виде пластов, линз, жил, клиньев и других форм мощностью от долей до десятков метров.

Разведка и изучение межмерзлотных вод представляет значительные трудности вследствие различных форм их залегания.

Подмерзлотные воды. В широком понимании *подмерзлотными водами* называются все подземные воды, залегающие ниже многолетнемерзлых пород. Они обладают напором, нередко в несколько сотен метров. По характеру залегания и условиям циркуляции подмерзлотные воды аналогичны подземным водам внемерзлотных районов. Условия же питания и стока подмерзлотных вод резко отличаются.

В настоящее время в пределах распространения многолетнемерзлых пород выявлены и более или менее изучены следующие артезианские бассейны: небольшая северо-восточная часть обширного Северо-Двинского бассейна, северная часть Печорского бассейна, большая часть Усинского и весь Коротаихский бассейн, северная часть Западно-Сибирского бассейна, Хатангский, Якутский, Ангаро-Ленский, Тунгусский бассейны. Подробное описание бассейнов приведено в специальной литературе.

§ 36. Источники в области распространения многолетнемерзлых пород

Для районов распространения многолетнемерзлых пород характерны специфические условия выходов подземных вод на поверхность. Источники этой области разделяются на нисходящие

и восходящие. Нисходящие источники образуются за счет надмерзлотных вод, расположенных выше местного базиса эрозии. По режиму источники надмерзлотных вод разделяются на сезонные и функционирующие в течение всего года. Дебит тех и других источников непостоянен.

Восходящие источники образуются за счет выходов подмерзлотных вод. Геологические условия выходов подмерзлотных вод весьма разнообразны. Режим источников осложняется мерзлотными факторами — оттаиванием и замерзанием путей движения воды, что обусловливает разделение восходящих источников на следующие виды: периодически исчезающие, мигрирующие, сменные сезонные, непостоянные по дебиту, постоянные. Режим восходящих источников, зависящий от замерзания и оттаивания путей движения воды, не отражает истинного состояния водоносного горизонта, питающего эти источники. Особо мощные по дебиту восходящие источники образуются в местах выходов на поверхность трещинно-карстовых подмерзлотных вод.

§ 37. Явления, связанные с многолетнемерзлыми породами

Наледи — ледяное тело, образовавшееся на поверхности земли или на льду реки в результате замерзания подземной или речной воды, излившейся на поверхность земли или ледяного покрова реки. Различают грунтовые, или наземные, наледи, речные и смешанные.

Грунтовые наледи образуются при замерзании выходящих на поверхность подземных вод. При промерзании деятельного слоя сверху вниз мощность замерзающего грунта, являющегося верхним водоупором, постепенно увеличивается, а еще не замерзшего уменьшается. Вода, находящаяся в еще не замерзшем деятельном слое, вследствие уменьшения его сечения приобретает напорные свойства и устремляется в места наименьшего сопротивления (в подвалы, котловины, дорожные выемки) либо по трещинам, образующимся в промерзшем грунте, и изливается на поверхность. Грунтовые наледи могут образоваться под отсыпанным в летний период слоем грунта, под штабелем угля, шлака, золы и т. п. Прорыв наледей в подвалах домов, бань и других сооружений выводит их из строя.

Речные наледи развиваются в результате увеличения напора воды в замерзающей реке в местах резкого сужения живого сечения потока или заполнения русла льдом. Речные наледи деформируют мосты, трубы, водозаборные сооружения, а также значительно осложняют движение транспорта по зимним дорогам, которые в этот период прокладываются по льду рек.

Размеры наледей изменяются от нескольких метров до многих десятков и сотен метров в длину и ширину при толщине ледяного покрова от долей метра до 4—6 *м* и иногда больше. Особенно гран-

диозные наледи площадью в десятки квадратных километров имеются в Якутии в бассейне р. Догды (хребет Тас-Аяхтах), где они образуются за счет выхода на поверхность крупных карстовых источников. Здесь наблюдаются наледи мощностью до 10 *м* и длиной до 27 *км*. По длительности существования наледи бывают однолетними (сезонными) и многолетними. Наледи причиняют значительные бедствия народному хозяйству, особенно автомобильным и железным дорогам, и на борьбу с ними ежегодно затрачиваются значительные средства.

Г и д р о л а к к о л и т ы — бугры вспучивания, образующиеся вследствие образования льда в толще промерзших пород (рис. 28),

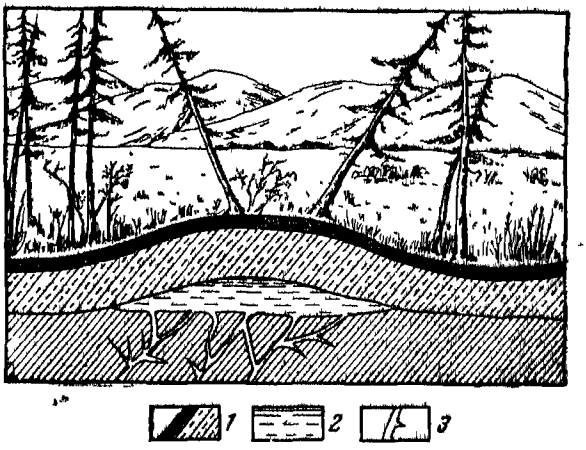


Рис. 28. Гидролакколит (по М. Я. Чернышеву)
1 — породы деятельного слоя; *2* — лед; *3* — водоносные трещины

т. е. при образовании п о д з е м н ы х н а л е д е й. Они бывают однолетние (сезонные) и многолетние. Гидролакколиты имеют округлую и куполовидную форму разной высоты. Крутизна склонов гидролакколитов нередко достигает 40°. Бывают также пологие вздутия и валообразные поднятия.

Чаще всего гидролакколиты образуются вдоль подножия склонов и в долинах малых водотоков, образуя при благоприятных условиях цепь бугров пучения разных размеров высотой до 2—3 *м*. Крупные гидролакколиты высотой 10—12 *м*, а нередко 15—17 *м* образуются в районах со сложным тектоническим строением, где подземные воды циркулируют по тектоническим трещинам и, поступая в верхние зоны литосферы, превращаются в инъекционный лед, рост которого приподымает лежащие на льду толщи грунтов. Наибольшее значение в образовании инъекционного льда и тем самым гидролакколитов имеют подозерные талики, при промерзании которых образуются гидролакколиты высотой от нескольких метров до 20—40 *м* и больше (до 70—80 *м*). Крупные гидролакколиты на аллювиальных равнинах значительно превышают высшие точки окружающей местности. В поперечнике крупные гидролакколиты достигают многих десятков метров (иногда 200—250 *м*).

Наледи и бугры пучения являются надежным поисковым признаком на подземные воды в районах распространения многолетнемерзловых пород.

Термокарст — замкнутые воронко-, котловино- или блюдцеобразные понижения, образующиеся вследствие вытаивания погребенного льда или оттаивания (деградации) вечномерзлого грунта с последующим его уплотнением. Термокарст во многих районах распространения вечной мерзлоты занимает до 30% площади и более. Термокарстовые понижения в большинстве своем заполнены водой, образуя озера и болота, площадь которых занимает нередко сотни квадратных метров, а иногда и километров. При образовании новых термокарстовых понижений под влиянием местных изменений термического режима многолетнемерзлых горных пород, которое происходит при застройке и освоении новых территорий, возникает серьезная угроза различным инженерным сооружениям. Поэтому при хозяйственном освоении новых территорий необходимо проводить специальные исследования в целях выявления потенциальной возможности развития термокарстовых процессов.

Солифлюкция — течение переувлажненного оттаявшего грунта деятельного слоя под влиянием силы тяжести. Солифлюкционные явления широко распространены на Крайнем Севере. Солифлюкция проявляется на склонах при небольших углах — всего несколько градусов. Известны случаи перехода солифлюкционного сплывания в оползни катастрофического характера. С явлениями солифлюкции связано образование особых форм рельефа — солифлюкционных террас на склонах, внешне напоминающих речные, земляных рек, шлейфов, а также преобразование рельефа вообще (образование мягкоочерченных солифлюкционных склонов, сглаживание гряд, холмов и других неровностей рельефа). Явления солифлюкции причиняют значительный ущерб различным сооружениям, главным образом дорогам, протрассированным вдоль склонов или на склонах. Поэтому при проектировании дорог возможность проявления солифлюкционных процессов на отдельных участках трассы дороги необходимо учитывать и заблаговременно проводить соответствующие профилактические мероприятия.

ГЛАВА XII

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВЫХОДЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Источники — сосредоточенные естественные выходы подземных вод на поверхность земли или под водой (подводный источник). Иначе источники именуются родниками, ключами, криницами. Источники представляют собой области дренирования или разгрузки водоносных горизонтов в местах, где последние вскрываются эрозионной сетью. Выход подзем-

ных вод на поверхность обусловливается тремя связанными и взаимно обусловливаемыми факторами: расчленением местности речными долинами, балками, озерными котловинами и т. п., на склонах которых вскрываются водоносные горизонты; структурно-геологическим строением местности — наличием тектонических трещин, разломов, антиклинальных складок с нарушенными сводами, крыльями и пр.; наличием интрузий и даек, в зонах контактов которых с осадочными породами могут образоваться открытые трещины, выводящие на поверхность подземные воды.

Выходы подземных вод на поверхность земли могут быть весьма разнообразными (рис. 29). В настоящее время общепринятой классификации источников, отражающей условия их выхода, связь

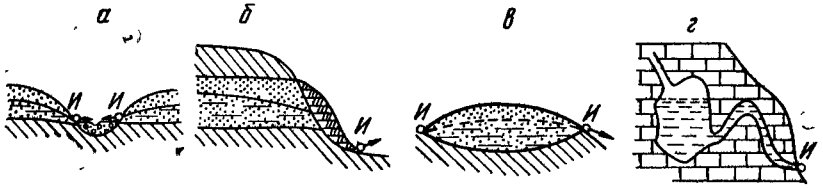


Рис. 29. Схемы выходов источников

а — симметричное расположение источников; *б* — источник, перекрытый делювием; *в* — переливающийся источник; *г* — сифонный источник; *И* — выход источника на поверхность

с различными типами подземных вод, режим, практическое использование и другие особенности, не существует. Имеются многочисленные частные классификации, приводимые в специальной литературе. Чаще всего они классифицируются по характеру выхода (гидравлическому признаку) на нисходящие и восходящие.

§ 38. Нисходящие источники

Нисходящие источники образуются при выходе на земную поверхность грунтовых или безнапорных межпластовых вод. Обычно нисходящие источники образуются на склонах речных долин, балок, оврагов и других местных понижений.

Если водоупорное ложе залегает горизонтально, то источники, а чаще мочажины и заболоченность образуются равномерно по обеим сторонам долины (см. рис. 29, *а*) примерно на одной и той же отметке; если водоупорное ложе наклонное, то источники выходят на одном склоне долины; когда склоны долины реки, вскрывающей водоносный горизонт, покрыты делювием (что обычно и наблюдается), то последний будет маскировать истинный выход грунтовых вод на поверхность (см. рис. 29, *б*).

Помимо постоянно действующих нередко встречаются периодически действующие источники, которые образуются в тех случаях, когда на поверхности водоупорного ложа имеются понижения (см. рис. 29, *в*). При повышении уровня грунтовых вод они начинают

переливаться через край впадины, образуя действующий источник, а при понижении источник иссякает. Подобные источники называются переливающимися.

В карстовых районах встречается особый тип периодически действующих источников, называемых сифонными (см. рис. 29, *г*). Подобные источники образуются тогда, когда канал, выводящий из карстовой пещеры воду наружу, имеет форму сифона. При повышении уровня воды в пещере до высоты верхнего колена сифона источник начинает действовать; когда вода из пещеры по сифону вытечет, источник иссякает. Карстовые источники типа сифонных характеризуются большими дебитами, но чрезвычайно неравномерным режимом. Они часто встречаются на Урале, в Тульской, Орловской областях, на Кавказе, в Крыму и в других областях СССР.

§ 39. Восходящие источники

Восходящие источники образуются при выходе на дневную поверхность пластового напорного (артезианского) горизонта (рис. 30) или водоносной жилы в кристаллических породах, содержащей напорные воды (жильные или трещинные источники) (рис. 31).

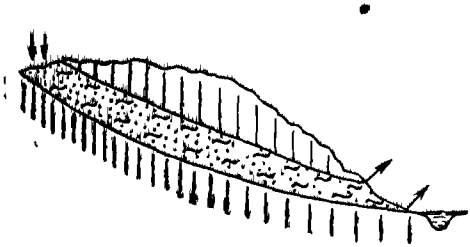


Рис. 30. Схема восходящего источника

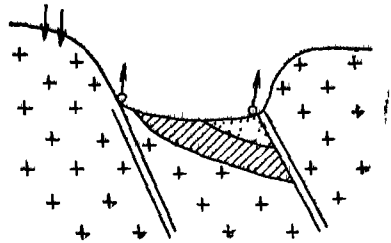


Рис. 31. Схема трещинного восходящего источника

Вода восходящих источников часто имеет лечебное значение (нарзан в Кисловодске, радоновые воды в Цхалтубо, источник Дарасун в Забайкалье и др.). К особой группе источников, встречаемых в районах молодой вулканической деятельности, относятся гейзеры — горячие источники, периодически выбрасывающие воду и пар. Извержения гейзеров происходят на высоту от нескольких метров до 30—60 *м* и более. Интервалы между извержениями продолжаются от нескольких минут до многих месяцев. Минерализация воды гейзеров 1—3 *г/л*, реже до 9—10 *г/л*; температура 80—100° С. Величественные группы гейзеров имеются на Камчатке, в США (Йеллоустонский парк), Исландии, Новой Зеландии и в других местах. Горячая вода гейзеров содержит большие запасы тепловой энергии и ныне широко используется на различные нужды.

Минеральные отложения источников состоят из охры, туфов (кремнистых или известковых), солей, грязи. Изучение отложений источников может дать очень ценные данные о происхождении источника, составе воды и ее изменении, а некоторые из них используются в практических целях (охры, туфы, грязи).

§ 40. Режим источников

Режим источников зависит от многих факторов как естественных, так и искусственных. По Н. Н. Биндеману, естественный режим источников подчиняется следующим закономерностям: чем больше совпадают площади питания и распространения водоносного горизонта, тем значительнее колебания дебитов. Колебания дебитов тем значительнее, чем ближе область питания к зоне дренирования, чем больше коэффициент фильтрации водоносного горизонта; если зона аэрации сложена слабопроницаемыми породами, колебания дебитов небольшие. Особенно велики колебания дебитов источников в карстовых областях. Дебит известного источника Аян в Крыму изменяется в разное время в 600 раз; примерно то же наблюдается в карстовых районах Кавказа (источник Адылсу и др.), Урала и в других местах.

ГЛАВА XIII

ПОДЗЕМНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ И ВОДЫ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

К природным минеральным водам относятся воды, имеющие: 1) лечебное значение; 2) промышленное значение, из которых возможно извлечение растворенных в них компонентов; 3) энергетическое значение; 4) термальные воды.

§ 41. Лечебные минеральные воды

Лечебные минеральные воды отличаются от прочих подземных вод физиологическим воздействием на организм человека, которое обусловлено наличием в них растворенных солей и газов. Лечебные минеральные воды на территории СССР широко распространены (рис. 32). Н. И. Толстихин и А. И. Дзенс-Литовский на территории СССР выделили три провинции лечебных минеральных вод, включающие ряд областей.

Первая провинция характеризуется распространением щелочноземельных гидрокарбонатных вод, газирующих углекислым газом. В ней выделяются области: Кавказская, Южный Памир и Южный Тянь-Шань, Восточные Саяны, Забайкалье, Сихоте-Алинь, Анийско-Анадырская.

Вторая провинция характеризуется распространением натриевых сульфатных, хлоридных, гидрокарбонатных и смешанных вод. В ней выделяются области: периферия Главного Кавказского хребта, Туркмено-Харасанская, Гиссаро-Алайская, Тянь-Шаньская, Алтайско-Саянская, Байкало-Олекминская, Ингодино-Чикойская, Буреинская, Сахалинская области, побережье Охотского моря и Восточная Якутия, особая область Камчатско-Корякская современного вулканизма, Чукотская.

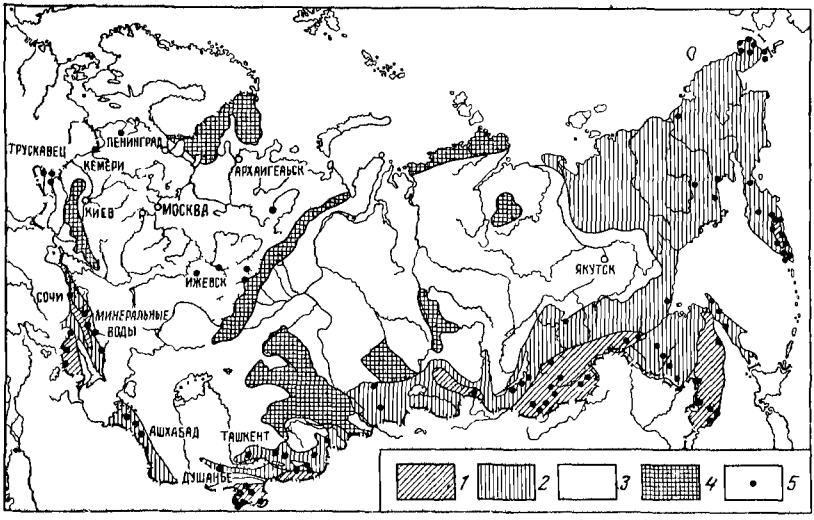


Рис. 32. Карта распространения минеральных вод на территории СССР (по Н. И. Толстихину)

1 — области углекислых вод; *2* — области азотных термальных вод; *3* — платформенные области с негазирующими хлоридно-натриевыми и хлоридно-кальциево-натриевыми водами (мелкими точками показаны районы сероводородных и метановых вод); *4* — области слабоминерализованных вод коры выветривания кристаллических и метаморфических пород, местами обогащенных радоном и металлами; *5* — минеральные источники

Третья провинция характеризуется распространением соленых, горько-соленых и сульфатных вод высокой минерализации, приуроченных к комплексу осадочных отложений на платформах. В ней выделяются области: Волго-Двинская, включая и Белоруссию; Печорская; Азово-Черноморская и Арало-Каспийская (южная); Обская (центральная); Лено-Енисейская (восточная).

В районах распространения лечебных минеральных вод организованы курорты, нередко очень крупные (Кисловодск, Ессентуки, Цхалтубо, Дарасун и др.), где излечиваются разнообразные болезни. Широкое распространение лечебных минеральных вод в СССР открывает неограниченные возможности строительства санаториев в самых различных областях нашей страны.

Тип минеральных лечебных вод определяется преобладанием в их составе определенных компонентов или их комбинаций, оказывающих наибольший лечебный эффект. Соответственно этому раз-

личают следующие главнейшие типы минеральных вод: углекислые, сероводородные и радиоактивные; имеются и другие классификации вод: йодистые, бромистые, железистые и т. п. Общепринятой классификации лечебных вод нет.

Углекислые воды. К этому типу относятся такие широко известные минеральные воды, как нарзаны. Углекислыми являются преимущественно слабо минерализованные воды гидрокарбонатного типа с общей минерализацией чаще всего в пределах 1—10 *г/л*. Характерной их особенностью является наличие в них углекислого газа, выделяющегося в виде пузырьков при выходе источников. Дебит свободно выделяющегося углекислого газа нередко в 1,5—3 раза превышает расход источника. Содержание свободной углекислоты колеблется в пределах 0,5—3,5 *г/л*.

Наиболее крупные районы углекислых источников расположены в очагах молодых интрузий. Углекислые воды образуются в результате того, что при температуре около 400° С из горных пород выделяется углекислота, которая и насыщает подземные воды различного химического состава. Так образуются слабо минерализованные гидрокарбонатно-кальциевые воды типа нарзанов Северного Кавказа, аршанов Монголии, Дарасун в Забайкалье, а также более минерализованные углекислые соляно-щелочные (гидрокарбонатно-хлоридные натриевые) воды типа Ессентуки № 17, Боржоми и др. и хлоридные натриевые соленые воды типа Арзни (в Армении).

Углекислые воды широко распространены на Кавказе, в Закавказье, на Карпатах, в Бурят-Монголии, Забайкалье и в других местах.

Сероводородные, или сульфидные, воды. К этому типу относятся минеральные воды с содержанием общего сероводорода не менее 10 *мг/л*. Сероводородные воды приурочены к осадочным отложениям и часто связаны с нефтяными месторождениями, где встречаются наиболее высококонцентрированные воды с содержанием H_2S более 0,15 *г/л*, а в отдельных пунктах — свыше 1 *г/л*, хлоридного натриевого или хлоридного кальциево-натриевого типа.

Наибольшей известностью пользуются следующие источники сероводородного типа: Мацеста (вблизи Сочи), Талги (Дагестан), Усть-Качка (Приуралье), Немиров, Любен-Великий (УССР), Сергиевские минеральные воды (Поволжье) и др.

Радиоактивные воды. Почти все подземные воды в той или иной степени радиоактивны, но большей частью радиоактивность невелика. В подземных водах могут содержаться соли радия или газовая эманация радия — радон. В последнем случае воды называются *радоновыми*, а содержащие соли радия — *радиевыми*.

Радиоактивные воды обычно связаны с кислыми интрузивными породами (гранитами и т. п.) или с продуктами их разрушения. Переход эманации радия в раствор происходит при разрушении пород, включающих радиоактивные элементы. Многие радоновые воды представляют собой холодные грунтовые воды, залегающие над массивами или жилами кислых изверженных пород.

Из минеральных радиоактивных источников известны Цхалтубо (Грузия), Белокуриха (Алтайский край), Хмельники (Украина), Пятигорские (Кавказ) и др..

§ 42. Промышленные воды

Промышленные воды содержат те или иные микроэлементы в количествах, дающих возможность извлечения их для промышленных целей. В образовании минеральных вод, обогащенных микроэлементами, важнейшее значение имеют процессы метаморфизма морской седиментационной воды и процессы, протекающие в коре выветривания. В настоящее время разработаны требования к промышленным водам, содержащим те или иные компоненты.

Концентрации компонентов корректируются рядом дополнительных факторов (глубиной скважин, их дебитом, глубиной динамического уровня и др.) и вопрос о целесообразности эксплуатации данного месторождения промышленных вод решается по совокупности технико-экономических показателей.

Повышенные концентрации брома обнаружены в девонских отложениях Башкирского свода.

Промышленными являются также воды, содержащие поваренную соль, соду и другие компоненты. Извлечение поваренной соли из рассолов подземных вод проводилось в России еще в древние века в районах распространения пермских отложений (Кировская, Пермская области и др.). Названия многих населенных пунктов — Соликамск и др. — свидетельствуют о былом процветании соляного промысла в этих местах. Сода в промышленных количествах содержится в нефтяных водах.

В некоторых случаях подземные воды содержат в растворенном виде бор, литий, никель, мышьяк, медь и др., которые могут быть извлечены из растворов.

Наиболее изученными являются промышленные йодные и бромные воды. Характерная особенность йодо-бромных вод состоит в том, что они являются рассолами высокой концентрации.

§ 43. Термальные воды

Термальными называются подземные воды, имеющие повышенную температуру. Воды с температурой 42—100° С называются гипотермальными, а свыше 100° С — перегретыми. В связи с повышенной химической и биологической активностью термальные воды обычно минерализованные, часто содержат повышенные концентрации ценных компонентов, имеющих промышленное или лечебное значение. Поэтому во многих случаях целесообразно использовать термальные воды одновременно для теплофикации, энергетики, лечебных целей и извлечения химических элементов.

Термальные подземные воды распространены на больших глубинах. Месторождения термальных вод приурочены к артезианским бассейнам и трещинным водонапорным системам. На территории

нашей страны обнаружены десятки месторождений подземных горячих вод в Белоруссии, в центральных областях Европейской части СССР, на Украине, на Кавказе, в Средней Азии, в Сибири, Забайкалье, на Камчатке. Особенно крупный бассейн находится в Западной Сибири (более 3 млн. $км^2$); горячие воды залегают здесь на глубине 1100—3000 $м$ и более. Общие запасы термальных вод нашей страны оцениваются многими сотнями миллионов кубометров и тепло этих вод, температура которых на глубинах до 7000 $м$ достигает 250—300° С, может заменить десятки миллионов тонн топлива. Только в Прикаспийской впадине энергетические запасы термальных вод в 840 раз превышают годовую выработку тепла за счет сжигания угля, нефти, газа, сланцев и дров (данные Ю. М. Васильева). Довольно полное описание термальных вод СССР можно найти в работе «Термальные воды СССР и вопросы их энергетического использования» (изд-во АН СССР, 1963) и в книге К. Ф. Богородицкого «Высокотемпературные воды СССР» (изд-во «Наука, 1968).

В СССР термальные подземные воды используются (правда еще недостаточно) в Тбилиси, Махачкале, Баку, Грозном, Майкопе, Ташкенте и ряде других городов. Изученность термальных вод СССР позволяет осуществить теплофикацию десятков городов, множества сельских населенных пунктов и построить геотермические электростанции, капитальные затраты и эксплуатационные расходы на которых, как показывает опыт Паужетской геотермальной электростанции на Камчатке, значительно меньше, чем на обычных тепловых электростанциях.

§ 44. Подземные воды нефтяных и газовых месторождений

Подземные воды при поисках, разведке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений имеют исключительно важное значение, поэтому гидрогеология нефтяных месторождений является одной из ведущих отраслей гидрогеологии, выделившись в самостоятельный раздел. Изучение вод нефтяных месторождений началось одновременно с геологическим изучением самих нефтяных месторождений. В развитии гидрогеологии нефтяных месторождений как самостоятельной отрасли научных знаний решающую роль играли работы советских исследователей, особенно В. А. Сулина, обобщившего огромный фактический материал и изучившего положение подземных вод нефтяных месторождений в геохимической системе природных вод.

Подземные воды представляют собой существенный элемент каждого нефтяного и газового месторождения; они являются одним из важнейших факторов формирования и разрушения нефтяных залежей. При разработке месторождений подземные воды проявляют себя, с одной стороны, как источник полезной энергии, обусловливая фонтанирование нефти, с другой — как фактор, препятствующий эксплуатации месторождений, обусловливая обводнение скважин.

Химический состав вод нефтеносных горизонтов формируется обычно при затрудненном водообмене или в застойной обстановке, при активном воздействии нефти. Поэтому воды нефтяных месторождений характеризуются весьма разнообразными химическими особенностями. Имеются различные классификации подземных вод нефтегазоносных месторождений по химическому составу. Гидрогеологи-нефтяники наиболее широко используют классификацию В. А. Сулина при поисках, разведке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений; по этой классификации подземные воды подразделяются на четыре типа: сульфатные натриевые, гидрокарбонатные натриевые, хлоридные магниевые и хлоридные кальциевые. Эти типы включают в себя группы, классы и подгруппы, которые подробно рассматриваются в специальной литературе [43, 45]. К продуктивным нефтеносным и газоносным пластам чаще всего приурочены гидрокарбонатные натриевые и особенно хлоридные кальциевые воды, не содержащие ион SO_4^{2-} или содержащие его в небольшом количестве.

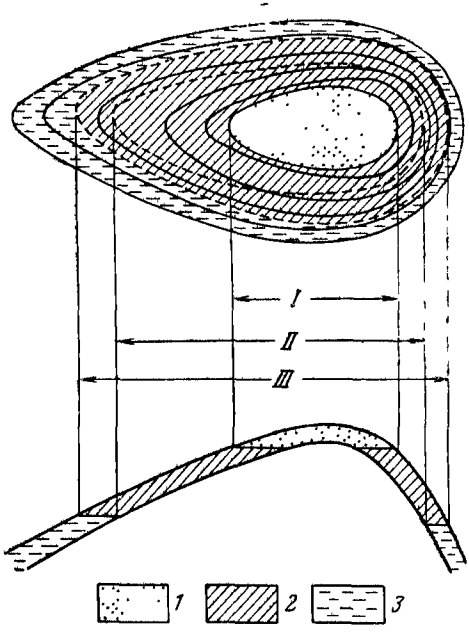


Рис. 33. Схема сводовой пластовой залежи нефти с газовой шапкой

1 — газ; *2* — нефть; *3* — вода; *I* — контур газовой шапки; *II* — контур водоносности; *III* — контур нефтеносности

Подземные воды являются обычным спутником нефти и газа, находясь с ними в тех же самых пластах (коллекторах). Так как удельный вес газа и нефти меньше удельного веса воды, то это приводит к скоплению газа и нефти в верхней части пласта (рис. 33). Помимо пластов, в которых нефть залегает вместе с водой, в разрезах нефтеносных месторождений имеются самостоятельные водоносные горизонты, как правило, с напорной водой, залегающие выше или ниже нефтяной залежи.

В зависимости от положения подземных вод относительно нефтяной залежи среди них выделяют (рис. 34):

1) пластовые, залегающие в одном пласте с нефтью и в свою очередь подразделяемые на а) нижние краевые, или контурные, залегающие в пониженных частях нефтеносного пласта и подпирающие нефтяную залежь, и б) подошвенные, залегающие в нижней, подошвенной части нефтеносного пласта в пределах всей структуры (включая ее сводовую часть);

2) верхние, приуроченные к водоносным пластам, залегающим выше нефтеносного пласта;

3) нижние, приуроченные к водоносным пластам, залегающим ниже нефтеносного пласта.

Основными источниками так называемой пластовой энергии в нефтеносных пластах являются: напор краевой (контурной) или подошвенной воды; напор газа, заключенного в газовой шапке; давление растворенного в нефти газа, расширяющегося в момент выделения газа в свободную фазу при снижении пластового давления; силы тяжести; упругость пласта и насыщающих его газа, нефти и воды. Эти силы, именуемые пластовым давлением,

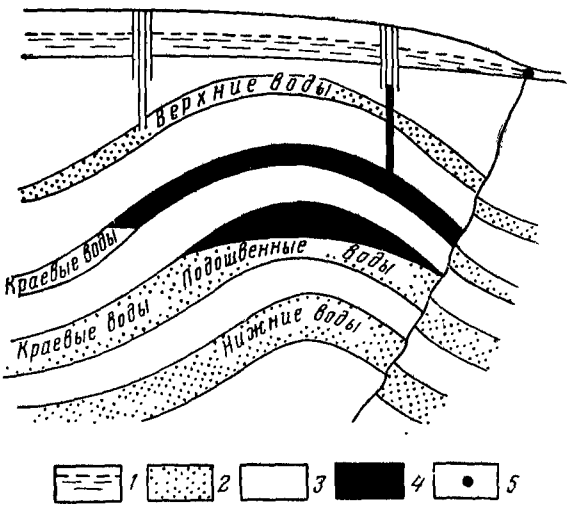


Рис. 34. Схема залегания подземных вод нефтяного месторождения

1 — грунтовые воды; *2* — артезианские водоносные горизонты; *3* — водоупорные породы; *4* — залежи нефти; *5* — восходящий источник по сбросовой трещине

могут проявляться раздельно или совместно. Чем выше пластовое давление, тем больше при прочих равных условиях запасы пластовой энергии и тем полнее может быть использована залежь нефти. Пластовое давление закономерно увеличивается с глубиной в пределах 0,8—1,2 *атм* на каждые 10 *м* глубины и в среднем составляют 1 *атм* на 10 *м*, что соответствует гидростатическому давлению воды.

В процессе эксплуатации нефтяных месторождений часто наблюдается обводнение эксплуатационных скважин и месторождения в целом; обводнение скважин и залежей может быть вызвано водами любой группы: контурными, подошвенными, верхними и нижними.

На рис. 35 показана схема обводнения пласта через скв. 1 и обводнение вследствие этого скв. 2. Поступление верхних и нижних вод через скв. 1 происходит через затрубное пространство в результате недостаточной изоляции этих вод колоннами обсадных труб.

При пересечении скважинами тектонических трещин также может произойти обводнение нефтеносного пласта. Схема обводнения подобным путем приведена на рис. 36. Верхняя вода через скв. 1,

пересекшую тектоническую трещину, поступает в нефтеносный пласт; поступление верхней воды через скв. 2 исключается.

Для предотвращения обводнения нефтеносного пласта верхними водами их необходимо изолировать от нефтеносного пласта. Нижние воды не следует вскрывать, а при случайном вскрытии изолировать путем цементации забоя скважины.

Подошвенные воды, вскрытые скважиной, вследствие меньшей вязкости обгоняют нефть, в связи с чем скважина с течением времени

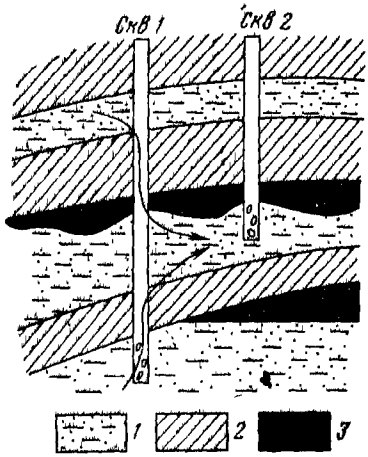


Рис. 35. Обводнение нефтяного пласта (по И. Фурману и М. Полякову)
1 — водоносные горизонты; 2 — водоупорные породы; 3 — нефть

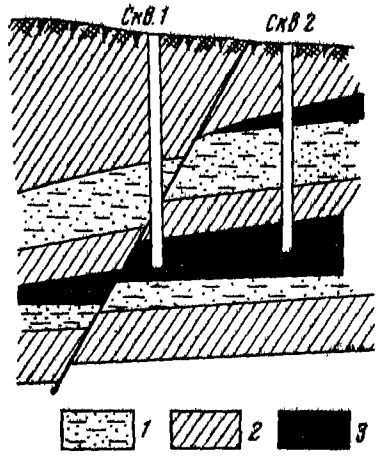


Рис. 36. Обводнение нефтяного пласта водой из тектонической трещины (по А. И. Силину-Бекчурину)
1 — водоносные горизонты; 2 — водоупорные породы; 3 — нефть

дает все большее количество воды, а затем почти чистую воду и выходит из эксплуатации. Около забоя скважины в подобных случаях образуется так называемый конус затопления. При наличии нескольких скважин отдельные конусы затопления сливаются, образуя сплошное водное зеркало, обращенное вершиной к забоям скважин (рис. 37), что вызывает выход из строя многих эксплуатационных скважин.

Обводнение нефтяного месторождения контурными водами происходит следующим образом. При наличии нижних краевых вод (контурных) водонефтяной контакт — ВНК — определяет внешний (по кровле пласта) и внутренний (по подошве пласта) контуры нефтеносности; часть пласта, расположенная в пределах внутреннего контура нефтеносности, содержит нефть по всей его мощности от подошвы до кровли; часть пласта между внутренним и внешним контурами нефтеносности содержит вверху нефть и внизу воду и называется приконтурной зоной (рис. 38). После начала эксплуатации положение приконтурной зоны начинает изменяться. Так как вода обладает значительно меньшей вязкостью, чем нефть,

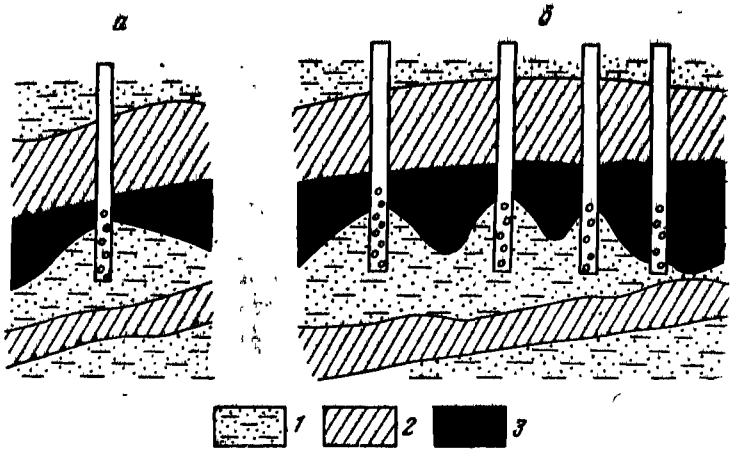


Рис. 37. Конусы затопления подошвенными водами (по А. И. Силину-Бекчурину)

а — простая форма конуса; *б* — сложная форма конуса; *1* — водоносные горизонты; *2* — водоупорные породы; *3* — нефть

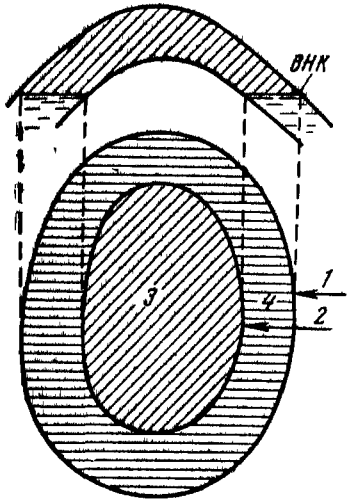


Рис. 38. Схема расположения водонефтяного контакта — ВНК (по М. А. Жданову)

1 — внешний контур нефтеносности (по кровле пласта); *2* — внутренний контур (по подошве пласта); *3* — нефтяная зона; *4* — приконтурная зона (зона расположения «водоплавающей» нефти)

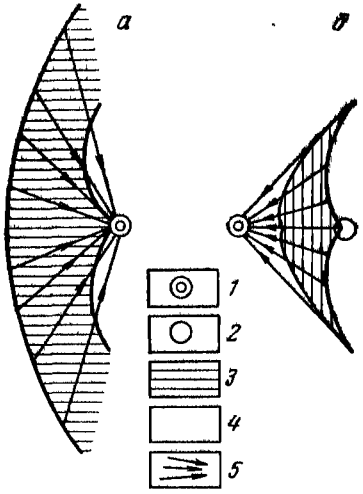


Рис. 39. Схема формирования (*а*) и оттяжки (*б*) языка контурных вод (по А. И. Силину-Бекчурину)

1 — эксплуатационная скважина; *2* — регулировочная скважина; *3* — пространство, занятое водой; *4* — пространство, освобожденное от воды; *5* — линии токов

скорость ее движения по пласту больше, чем у нефти. Поскольку проницаемость пород различна, то движущаяся по наиболее проницаемым частям контурная вода образует языки обводнения, внедряющиеся в нефтяную залежь, разделяя ее на отдельные участки, отжатые от эксплуатационных скважин конусами затопления (см. рис. 37, *б*).

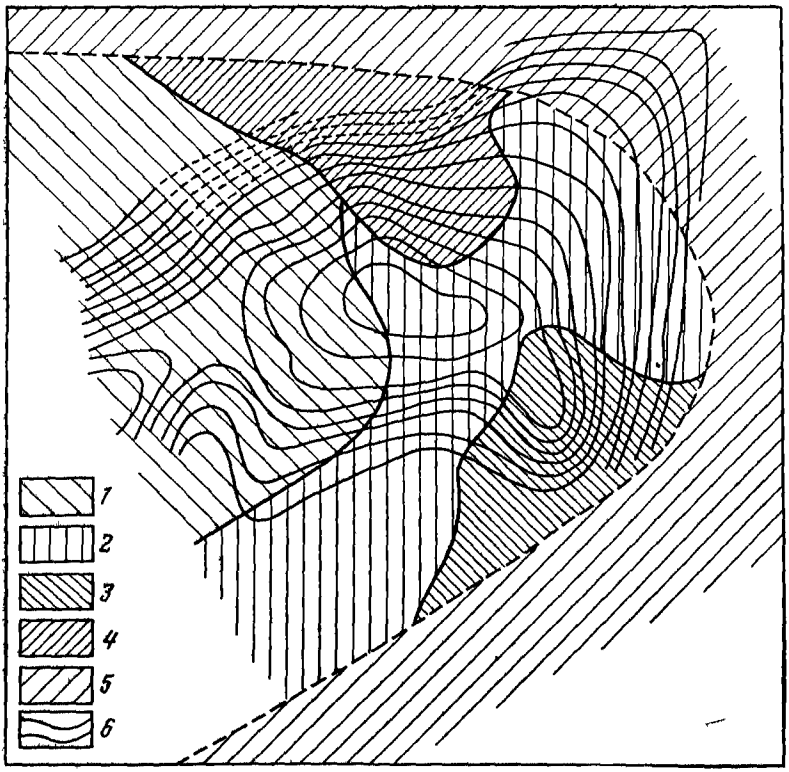


Рис. 40. Схема обводнения нефтяного месторождения (по А. И. Силину-Бекчурину)
1 — участки, обводнившиеся подошвенными водами; *2* — участки, обводнившиеся вначале подошвенными, а затем контурными водами; *3* — участки, обводнившиеся контурными водами с минерализацией 380 *мг·экв* на 100 *г* воды; *4* — участки, обводнившиеся контурными водами с минерализацией 340—360 *мг·экв* на 100 *г* воды; *5* — зона распространения контурных вод до начала эксплуатации месторождения; *6* — стратоизогипсы

Поэтому одной из важнейших задач рациональной разработки нефтяных месторождений является обеспечение равномерного продвижения приконтурной зоны. Об обводнении скважин контурными водами судят по медленно увеличивающемуся проценту ее обводненности, а также по изменению минерализации подземных вод, все более приближающейся к минерализации контурных вод. Мерой борьбы с продвижением языка обводнения может служить откачка воды из регулировочной скважины, закладываемой сзади языка на некотором расстоянии от эксплуатационной (рис. 39).

Определение скоростей перемещения отдельных участков контура нефтеносности, положения водонефтяного контакта (ВНК) и участков обводнения нефтяного месторождения различными водами производится по результатам изучения режима месторождения и данным гидрогеологических наблюдений, проводимых в эксплуатационных скважинах периодически в процессе эксплуатации. Для каждой скважины составляются графики их эксплуатационного режима, в частности графики изменения химического состава подземных вод; сопоставляя графики изменения химического состава вод с первоначальными данными о составе вод различных категорий, судят о характере обводнения эксплуатируемого месторождения. В качестве примера на рис. 40 приводится схема обводнения месторождения. На карте выделены контуры участков, обводненных подошвенными и контурными водами, и отчетливо вырисовывается внедрение в месторождение двух встречных языков контурных вод. Строятся также карты изобар пластового давления, графики суммарной добычи жидкости, суммарной добычи нефти, среднего пластового давления и другие, которые в хронологическом порядке отображают характеристику эксплуатации пласта.

Методика ведения гидрогеологических наблюдений на эксплуатируемых месторождениях, способы построения графиков, карт и т. п. изложены в многочисленных специальных руководствах.

Мероприятия по искусственному воздействию на пласт. В процессе эксплуатации нефтяных месторождений из-за различных причин, в том числе обводнения, неизбежного при самых рациональных способах эксплуатации, не вся нефть извлекается из нефтеносного пласта, а само извлечение не всегда достаточно интенсивно во времени. Сейчас разработаны и широко внедрены в практику различные методы воздействия на пласт с целью интенсификации добычи и максимально возможного извлечения нефти из недр. Среди этих методов большое распространение получили методы поддержания или повышения давления в пласте, содержащем нефть, путем законтурного и внутриконтурного заводнения.

Законтурное заводнение. Этот метод применяется с начала промышленной эксплуатации. Сущность его сводится к искусственному созданию активного водонапорного режима в пластах, в которых естественного стягивания контуров нефтеносности (см. рис. 38) в результате замещения пластовой водой извлеченной нефти недостаточно для поддержания давления на нужном уровне. Законтурное заводнение осуществляется следующим образом (рис. 41). На некотором расстоянии от внешнего контура нефтеносности закладываются нагнетательные скважины, через которые в пласт закачивается вода в объеме, равном объему извлекаемой пластовой жидкости (нефти и воды). В результате пластовое давление в залежи сохраняется, что и обеспечивает фонтанирование скважин.

Внутриконтурное заводнение. При этом методе воду нагнетают в нагнетательные скважины, располагаемые внутри контура нефтеносности (рис. 42). Такую систему разработки применяют для пластов

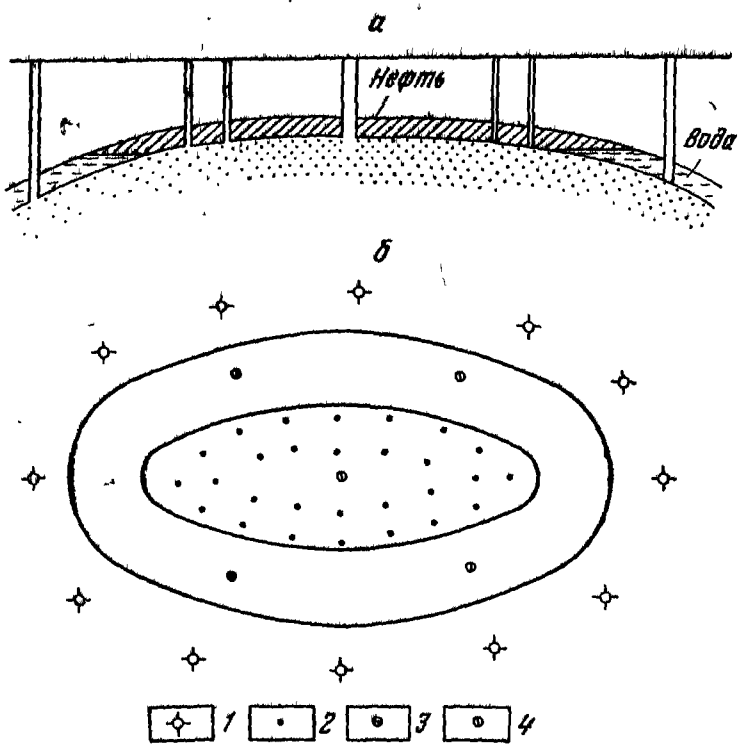


Рис. 41. Схема законтурного заводнения (по М. А. Жданову)

а — продольный разрез; *б* — план; *1* — скважины нагнетательные; *2* — скважины эксплуатационные; *3* — скважины, предназначенные для наблюдения за изменением пластового давления; *4* — скважины контрольные для определения скорости продвижения воды

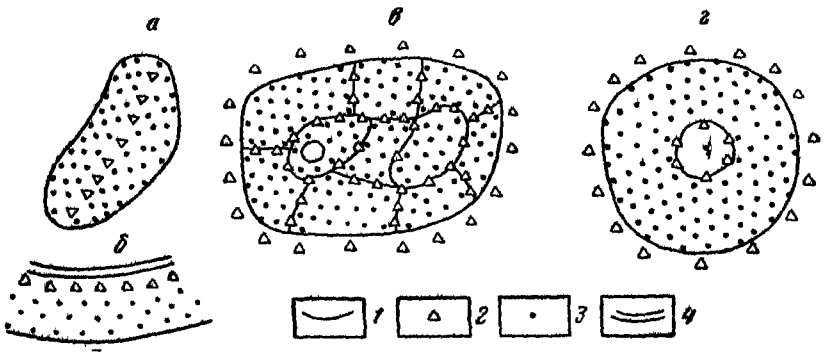


Рис. 42. Схема внутриконтурного заводнения (по М. А. Жданову)

а — осевое или сводовое заводнение; *б* — головное заводнение; *в* — комбинация внутриконтурного заводнения с разрезанием залежи в сочетании с законтурным заводнением; *г* — схема центрального заводнения в комбинации с законтурным; *1* — контур нефтеносности; *2* — нагнетательные скважины; *3* — эксплуатационные скважины; *4* — верхняя граница залежи

с ухудшенной проницаемостью в законтурной и приконтурной зонах, а также на месторождениях с большой площадью нефтеносности, для которой одного законтурного заводнения недостаточно.

§ 45. Особенности разведки минеральных вод и вод нефтегазоносных месторождений

Гидрогеологические исследования на месторождениях минеральных вод характеризуются некоторыми особенностями. Они преследуют следующие цели: выявление условий формирования, распространения и геологического строения месторождения; определение генетического типа месторождения, химического состава и содержания полезных компонентов минеральной воды; оконтуривание месторождения; выбор наиболее благоприятных участков для эксплуатации воды; подсчет эксплуатационных запасов минеральной воды, изучение ее режима; рекомендация наиболее рациональных типов каптажных сооружений; установление зон горно-санитарной охраны.

Разведочные работы на месторождениях минеральных вод подразделяются на два основных этапа — поиски и разведку, которые в свою очередь делятся на две стадии. К первой стадии поисков относится обработка данных глубокого опорного бурения, и на основе геологических карт масштаба 1 : 1 000 000—1 : 200 000 составляются карты распространения минеральных подземных вод. Ко второй стадии поисков относится изучение предварительно намеченных эксплуатационных участков путем пробных откачек, наблюдений за восстановлением уровней в скважинах и изучение физических свойств и химического состава воды. По результатам поисковых работ выделяются перспективные водоносные горизонты и намечаются эксплуатационные участки для проведения разведок. Запасы оцениваются по категории C_2 и иногда по категории C_1.

На стадии разведок проводятся опытные откачки длительностью до трех месяцев, длительные наблюдения за режимом подземных вод, определяются все расчетные гидрогеологические параметры и подсчитываются запасы по категории В и частично А. По данным детальных гидрогеологических исследований для каждого выделенного эксплуатационного участка окончательно устанавливаются его границы, статические и динамические уровни, производительность скважин, их конструкция, рациональное взаимное расположение, решаются другие вопросы практического характера и окончательно уточняются запасы по категориям А и В.

Успех исследований по изучению минеральных вод зависит от применения наиболее совершенных методов изучения, весьма тщательного анализа геологической структуры, включая и области питания и формирования минеральной воды, глубокого изучения физико-химического и газового состава минеральных вод, правильно намеченных и проведенных поисковых и разведочных работ, тщательного анализа динамики и режима минеральных вод. Особенно ценными являются геофизические методы разведки, а при изучении

минеральных вод на нефтяных месторождениях — также газовая и микробиологическая съемка. При ведении режимных наблюдений особое внимание следует обращать на искусственные факторы, создаваемые человеком в процессе эксплуатации месторождений минеральных вод: неправильный режим при эксплуатации может обусловить падение дебита каптажных сооружений, изменение физических свойств и химического состава воды в худшую сторону и т. п.

При поисках и разведке нефтяных и газовых месторождений, помимо геохимических, радиоактивных и геофизических методов, широко применяются и гидрогеохимические методы. Гидрогеохимические показатели нефтегазоносности подразделяются на прямые и косвенные. Прямыми показателями являются содержание в подземных водах нафтеновых кислот, фенолов, битумов и газов, насыщенных тяжелыми углеводородами (этаном, пропаном, бутаном и др.). Косвенными показателями являются: высокая минерализация подземных вод (нередко свыше 200 *г/л*); высокое содержание хлоридов натрия (до 95—98% *мг·экв*); низкое содержание иона SO_4^{2-} или полное его отсутствие; наличие хлоридов кальция или гидрокарбоната натрия и высокое содержание йода, брома, бора, аммония и повышенная радиоактивность; высокая насыщенность азотом биохимического происхождения и повышенное содержание в азотных газах гелия и углекислого газа. Наиболее подробно гидрогеохимические методы поисков и разведки нефтеносных и газоносных месторождений изложены в книге В. Н. Корценштейна «Методика гидрогеологических исследований нефтегазоносных районов» (Гостоптехиздат, 1963) и в других специальных руководствах.

ГЛАВА XIV

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

§ 46. Виды передвижения воды в породах

Передвижение воды в горных породах зависит в основном от водных свойств пород и степени насыщенности их водой. Передвижение подземных вод можно подразделить на два вида: негравитационное и гравитационное. Первый вид движения характерен для физически связанной и капиллярной воды, он присущ мелкодисперсным (глинистым) породам и обусловлен действием различных факторов; второй вид движения имеет место в порах раздельнозернистых или в трещинах трещиноватых горных пород при наличии разности уровней и обусловлен действием сил гравитации.

Негравитационное движение воды возникает при наличии разностей в упругости водяного пара, в толщине пленок физически связанной воды, в диаметре пор, температур, различий

в минеральном составе (различия гидрофильность минералов), разности концентрации порового раствора и других факторов. Негравитационное движение воды получило название *миграции влаги* и играет большую роль в распределении естественной влажности рыхлых пород в зоне аэрации. Скорость миграции обычно мала.

Гравитационное движение воды. Под гравитационным движением воды понимают *свободное* движение части атмосферных осадков, просачивающихся вниз от поверхности земли небольшими порциями, отдельными разрозненными струями или каплями в зоне аэрации под действием силы тяжести. Передвижение подземных вод ниже их зеркала, в зоне полного насыщения, носит название *фильтрации* и происходит при наличии гидравлического напора или гидростатического давления, т. е. давления, оказываемого залегающими выше массами воды. В гидрогеологии изучается главным образом этот вид передвижения подземных вод.

Раздел гидрогеологии, изучающий закономерности движения подземных вод под влиянием естественных или искусственных факторов в зоне полного насыщения пород водой, называется *динамикой подземных вод*. Начало изучению законов движения подземных вод было положено работами французского гидравлика Г. Дарси в 1856 г., который установил основной *линейный закон фильтрации* в пористой среде, названный его именем, и ввел понятие о коэффициенте фильтрации, или водопроницаемости.

Различают *установившееся*, или *стационарное*, и *неустановившееся*, или *нестационарное*, движения подземных вод. При установившемся движении параметры потока — мощность, напорный градиент, скорость и расход в любом сечении — не изменяются во времени. Для неустановившегося движения характерно изменение указанных параметров потока во времени. Различают также *равномерное* движение, при котором скорость его во всех сечениях одинакова, и *неравномерное*, характеризующееся изменением скорости по пути потока. Движение подземных вод всегда является неустановившимся. Однако, когда условия питания и разгрузки подземных вод мало изменяются во времени, движение их рассматривается как установившееся, что значительно упрощает гидрогеологические расчеты.

§ 47. Основные законы движения подземных вод

При полном насыщении пустот в горных породах водой передвижение, или фильтрация, ее в водонасыщенных пластах происходит под влиянием разности напоров от мест с более высокими уровнями к местам с более низкими уровнями. Различают безнапорную и напорную фильтрацию. *Безнапорная фильтрация* присуща грунтовым водам, когда поверхность фильтрующейся воды всегда является свободной, давление на нее постоянно и равно атмосферному. Напорная фильтрация свойственна артезианским водоносным горизонтам, в которых давление всегда выше атмосферного и равно высоте пьезометрического уровня в данной точке.

Безнапорное движение подземных грунтовых вод происходит при наличии разности уровня ее в двух сечениях (рис. 43). Разность уровней $\Delta H = H_1 - H_2$ в сечениях I и II и обусловливает движение воды в направлении сечения II.

Скорость движения подземного потока зависит от разности напора (чем больше ΔH, тем больше скорость) и от длины пути фильтрации l (чем меньше l при том же значении ΔH, тем скорость больше).

Отношение разности напора ΔH к длине пути фильтрации l называется гидравлическим уклоном, или гидравлическим градиентом, и обозначается через I:

$$I = \frac{\Delta H}{l}. \qquad (23)$$

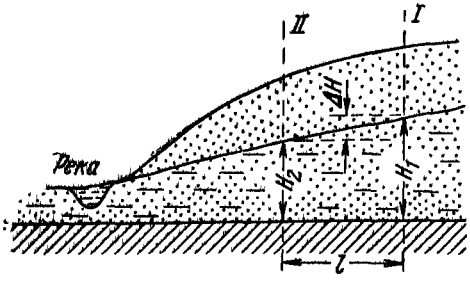


Рис. 43. Схема безнапорной фильтрации

Линейный закон фильтрации (закон Дарси). Движение подземного потока в пористых породах (в песке, супеси, суглинке) имеет *параллельно-струйчатый*, или *ламинарный характер*, т. е. без разрывов и пульсации, с плавным изменением скорости и подчиняется закону Дарси. Как показали исследования Н. Н. Павловского, Г. Н. Каменского, Н. К. Гиринского, С. В. Троянского и других, ламинарный характер движения наблюдается также в трещиноватых породах и кавернозных известняках при скоростях, не превышающих 300—400 *м/сутки*. Переход от ламинарного движения к турбулентному в крупнотрещиноватых и закарстованных породах возможен только в непосредственной близости от поверхности водоприемника (фильтра), на расстоянии не более 1,5 *м*, что составляет очень малую величину по сравнению с областью, где наблюдается движение подземных вод, обусловленное откачками из данного водозабора. Даже при значениях коэффициента фильтрации около 1000 *м/сутки* (встречающихся как исключение) зона отклонения от линейного закона фильтрации, наблюдаемая вблизи водозабора, является незначительной по сравнению со всей областью фильтрации. Следовательно, в реальных условиях движение подземных вод следует рассматривать как подчиняющееся линейному закону фильтрации.

Основной закон фильтрации — *закон Дарси* — выражается формулой:

$$Q = K \cdot F \frac{\Delta H}{l} = K \cdot F \cdot I, \qquad (24)$$

где Q — расход воды (количество фильтрующейся воды в единицу времени);

K — постоянная величина для данной породы, характеризующая ее водонепроницаемость; эта величина называется *коэффициентом фильтрации* или *водопроницаемости*;

F — площадь поперечного сечения потока;

ΔH — напор или разность уровней в двух рассматриваемых сечениях (см. рис. 43);

l — длина пути фильтрации;

I — гидравлический уклон.

Разделив обе части уравнения (24) на площадь F и назвав $\frac{Q}{F}$ скоростью фильтрации V, получим

$$V = K \cdot I. \tag{25}$$

Уравнение (25) показывает, что по *линейному* закону (при ламинарном движении) *скорость фильтрации прямо пропорциональна* гидравлическому градиенту.

Если принять $I = 1$, то по уравнению (25) получим, что

$$V = K, \tag{26}$$

т. е. *при гидравлическом градиенте, равном единице, коэффициент фильтрации численно равен скорости фильтрации.* Его размерность та же, что и скорости (*м/сутки, м/сек, см/сек*).

Скорость фильтрации не представляет собой действительной скорости движения воды в порах или трещинах. Это *кажущаяся*, или *приведенная*, величина скоростей, отнесенная ко всему поперечному сечению фильтрующейся породы. С этой скоростью вода двигалась бы в том случае, если бы она занимала все сечение F как в открытых каналах или трубах. В действительности при фильтрации в горных породах вода течет только через часть сечения F, равную площади пор и трещин, другая же часть этого сечения занята зернами породы.

Действительную скорость движения воды U получают делением расхода Q на действительную площадь фильтрующего сечения, которая равна площади всего сечения фильтрующей поверхности F, умноженной на площадь пор n, т. е. пористость в долях единицы:

$$U = \frac{Q}{F \cdot n}. \tag{27}$$

Сопоставляя уравнения (25) и (27), получим

$$V = U \cdot n \quad \text{и} \quad U = \frac{V}{n}. \tag{28}$$

Так как пористость всегда меньше единицы, то скорость фильтрации всегда меньше действительной скорости движения воды в породах примерно в 3—4 раза.

Нелинейный закон фильтрации. В грубообломочных и особенно сильнотрещиноватых скальных породах при наличии крупных пустот и трещин, имеющих большую протяженность,

движение подземных вод носит характер движения воды по каналам и трубам. Это движение имеет *вихревой*, или *турбулентный вид*. Оно характеризуется вихреобразностью, пульсацией и перемешиванием отдельных струек воды.

Нелинейный закон фильтрации выражается формулой А. А. Краснопольского:

$$V = K \cdot \sqrt{I} = K \cdot I^{\frac{1}{2}}, \tag{29}$$

где K — коэффициент фильтрации породы;

I — гидравлический уклон.

Из уравнения (29) следует, что при турбулентном движении скорость фильтрации пропорциональна гидравлическому уклону в степени $\frac{1}{2}$.

§ 48. Коэффициент фильтрации и методы его определения

В приведенных уравнениях движения подземных вод основной расчетной величиной, количественно характеризующей фильтрационные свойства горных пород, является коэффициент фильтрации, широко используемый при решении многих практических вопросов.

Коэффициент фильтрации определяется следующими методами:

1) полевыми опытно-фильтрационными работами — откачками, наливами, нагнетанием и инфильтрацией из шурфов;

2) в лаборатории с помощью различных приборов;

3) по эмпирическим формулам.

Определения коэффициента фильтрации с помощью приборов в лабораторных условиях и по эмпирическим формулам изложены в специальных руководствах [43, 45, 53] и здесь не рассматриваются.

Откачки, проводимые в поле, дают наиболее точные данные для расчета коэффициента фильтрации и других гидрогеологических параметров. Откачки разделяются на откачки из одиночных скважин, кустовые и групповые, а также на пробные, опытные и опытно-эксплуатационные.

Откачки из одиночных скважин дают возможность определить более или менее точно только зависимость дебита от понижения и так называемый удельный дебит, что является достаточным для предварительной оценки водообильности изучаемых пород. Произвести точный расчет коэффициента фильтрации по результатам откачки из одиночной скважины нельзя, так как неизвестны величина радиуса влияния, а также величина разности уровня в самой скважине и за ее стенками, так называемая величина скачка, или прыжка.

Кустовые откачки проводятся на специально выбранных опытных участках при глубине залегания водоносного горизонта не более 100 *м*. Опытный куст состоит из центральной (опытной) скважины и ряда наблюдательных, располагаемых по одному или нескольким лучам в случае неоднородности водоносного пласта

(рис. 44). В соответствии с инструкцией [11] примерные расстояния между опытной и наблюдательными скважинами указаны в табл. 7.

По результатам кустовой откачки точно определяют основные гидрогеологические характеристики опробуемого водоносного горизонта: зависимость дебита от понижения, коэффициент фильтрации, взаимосвязь с другими водоносными горизонтами, радиус питания, коэффициенты уровнепроводности и пьезопроводности.

Групповые откачки проводятся одновременно из двух или нескольких скважин для выявления взаимовлияния скважин друг на друга и определения коэффициента снижения их дебита α и коэффициента влияния β (см. § 51); проводятся на одно, реже два понижения, продолжительность их должна быть в 2—3 раза больше продолжительности опытных откачек из одиночных скважин.

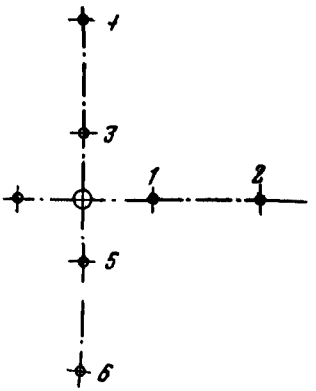


Рис. 44. Схема опытного куста скважин

Пробные откачки проводятся из одиночных скважин на одну-две ступени понижения уровня продолжительностью 1—3 смены на каждое понижение. Получаемые материалы позволяют предварительно оценить водоносность вскрытого горизонта и качество подземных вод.

Опытные откачки проводятся из одиночных скважин или опытного куста на стадии детальных исследований для определения всех расчетных гидрогеологических параметров на участках

Таблица 7

Расстояния наблюдательных скважин от опытной

Порода	Расстояние наблюдательных скважин от центральной, м					
	Напорные воды			Безнапорные воды		
	№ наблюдательных скважин					
	1	2	3	1	2	3
Мелкозернистые пески . . .	3—5	10—15	—	2—3	10—12	—
Среднезернистые, крупнозернистые и разнозернистые	5—8	20—25	—	3—5	12—15	—
Гравийно галечниковые породы	8—10	15—20	30—40	4—6	10—15	20—30
Скальные слаботрещиноватые породы	6—8	15—20	30—40	5—7	10—15	20—30
Скальные сильнотрещиноватые породы	15—20	40—50	80—100	10—15	20—30	40—60

Примечание При кустовой откачке в песках третья наблюдательная скважина на луче обычно не бурится

возможного расположения водозаборов, устраиваемых для водоснабжения, осушения или иных целей.

Опытно-эксплуатационные откачки проводятся в особо сложных гидрохимических и гидрогеологических условиях для определения возможных изменений качества подземных вод во времени, установления минимальных количеств воды, которые можно будет отбирать из данного водоносного горизонта и для наиболее достоверного определения гидрогеологических параметров. Проводятся при постоянном дебите на одно максимальное понижение в течение продолжительного времени (1,5—2 месяца и более). При опытной откачке из одиночной скважины минимальная величина понижения принимается равной 1 *м* и более (до 0,1—0,2*H*), а максимальная — 3 *м* и более, но не должна превышать $^1/_3$—$^1/_2$ длины фильтра. При каждом понижении откачка ведется с постоянным дебитом до практической стабилизации уровня, за который принимается уровень, изменяющийся в течение 4—5 *ч* не более чем на ±1 *см*.

При кустовой откачке понижения в центральной скважине принимаются такими, которые обеспечивали бы понижения в дальних наблюдательных скважинах не менее 0,3—0,5 *м* и разность между

Таблица 8

Продолжительность откачек

Водовмещающие породы	Коэффициент фильтрации, *м/сутки*	Гидравлический режим	Примерная продолжительность откачек на максимальное понижение, *сутки*	
			одиночные	кустовые и групповые
I. *Грунтовые и неглубокие напорные воды (200 м)*				
Трещиноватые и закарстованные породы; гравийно-галечниковые отложения без примеси мелких частиц, крупные и средиезернистые пески	Более 30	Напорный Безнапорный	2—3 3—4	3—5 4—6
Трещиноватые и закарстованные породы; гравийно-галечниковые отложения с песчаным и супесчаным заполнителем	10—30	Напорный Безнапорный	3—4 4—6	4—6 5—7
Неоднородные крупно-, средне- и мелкозернистые пески	5—10	Напорный Безнапорный	4—6 5—7	5—7 6—8
II. *Глубокие напорные воды*				
Трещиноватые породы, уплотненные пески	0,5—5	Упругий, высокоапорный	3—5	5—7
То же	5	То же	5—7	7—10

Примечание. Продолжительность опытных откачек на меньшие понижения по сравнению с максимальными, как правило, может быть сокращена

понижениями уровней в соседних наблюдательных скважинах не менее чем на 0,2—0,3 *м*. Примерная продолжительность откачек в соответствии с инструкцией [13] указана в табл. 8.

Во время откачки замеры уровней в скважинах в первые полчаса делают через 10 *мин*, в последующие 2 *ч* — через 15 *мин*, затем в течение 12 *ч* — через 30 *мин* и далее до конца откачки — через 1 *ч*. Измерения количества откачиваемой воды проводят в те же сроки. По окончании откачки замеры восстановления уровней в течение первых 30 *мин* ведут через 1—3 *мин*, в течение следующего часа — через 3—5 *мин*, а затем через 30 *мин* — до стабилизации уровней, когда скорость подъема уровней менее 1 *см/ч*. Данные наблюдений за восстановлением уровней в наблюдательных скважинах используются для определения коэффициентов фильтрации, уровнепроводности и пьезопроводности. В процессе откачек проводятся замеры температуры воды и отбираются пробы воды для определения физических свойств и химического состава. Порядок отбора проб воды указывается в проекте работ по разведке данного месторождения.

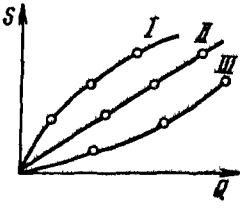


Рис. 45. Кривые зависимости дебита от понижения уровня

Изложенная методика откачек предусматривает установившийся режим движения подземных вод. В действительности же в процессе опытных откачек чаще имеет место неустановившийся режим, а при длительных сроках работы водозаборных и дренажных сооружений, продолжающихся в течение многих лет, движение подземных вод всегда является неустановившимся. Поэтому в последнее время для получения гидрогеологических параметров, характеризующих неустановившуюся фильтрацию, опытные работы рекомендуется проводить по следующей методике: при постоянном дебите и изменяющемся во времени динамическом уровне или при постоянном динамическом уровне и изменяющемся во времени дебите. Первая схема наиболее применима при откачке с больших глубин, вторая — при откачке с небольших глубин (до 5—7 *м*). Откачки при неустановившемся режиме фильтрации позволяют получать более достоверные данные для определения гидрогеологических параметров опробованных водоносных пластов, что в свою очередь значительно повышает точность гидрогеологических расчетов с использованием этих параметров.

Обработка результатов откачек заключается в составлении графика, определении коэффициентов фильтрации, удельных дебитов, пьезопроводности, уровнепроводности и приведенного радиуса влияния. Графический материал состоит из геологических разрезов по линии наблюдательных скважин (по каждому лучу), на которые наносятся статические и динамические уровни, достигнутые при каждом понижении (таким образом, по каждому лучу получают депрессионную воронку); графика изменения дебита и уровней воды во

время откачек; графика зависимости дебита от понижения; графика зависимости удельного дебита от понижения.

При откачках существенное значение имеет график зависимости дебита от понижения. Он дает возможность еще в процессе откачки контролировать качество работ. График строится следующим образом (рис. 45). По вертикальной оси откладываются понижения (в *м*), а по горизонтальной — дебиты (в *л/сек* или *м³/сутки*). При откачках из ненапорного горизонта зависимость между дебитом и понижением изображается кривой *II*, из напорного кривой *I*; если же при построении графика получится кривая *III* или ломаная линия, то это будет свидетельствовать о некачественном проведении работ по откачке и их надо провести заново.

Расчеты коэффициентов фильтрации и других гидрогеологических параметров являются наиболее существенным моментом работ при обработке результатов откачек. Расчет коэффициентов фильтрации ведется по различным формулам в зависимости от ряда условий: из одиночных скважин или кустов проводились откачки; напорности вод; близости или, наоборот, удаленности скважин от реки; типа скважин (совершенные или несовершенные) и для последнего случая — от положения фильтра в водоносном пласте, его длины и соотношения между длиной фильтра и мощностью пласта; при откачках из ненапорного водоносного горизонта следует учитывать также затопленным или незатопленным был фильтр при откачке, т. е. был ли уровень воды в скважине при откачке выше фильтра, или же он находился в пределах фильтра; для установившегося или неустановившегося режима.

Для всех указанных случаев существуют различные формулы, подчас очень сложные и громоздкие, расчет коэффициента фильтрации по которым весьма труден. Критический разбор имеющихся формул для расчета коэффициента фильтрации и других гидрогеологических параметров и возможность их применения применительно к различным условиям подробно излагаются в многочисленной специальной литературе [1, 7, 11, 16, 19, 40, 43, 45, 49]. Чаще всего применяются следующие формулы для расчета коэффициента фильтрации по данным откачек при установившемся режиме фильтрации.

При откачке из одиночных совершенных скважин:
безнапорные воды

$$K = 0{,}732Q\,\frac{\lg R - \lg r}{(2H - S)\,S}, \qquad (30)$$

напорные воды

$$K = 0{,}366Q\,\frac{\lg R - \lg r}{mS}. \qquad (31)$$

При кустовых откачках из совершенных скважин:
безнапорные воды

$$K = 0{,}732Q\,\frac{\lg X_2 - \lg X_1}{(2H - S_1 - S_2)\,(S_1 - S_2)}, \qquad (32)$$

напорные воды

$$K = 0{,}366Q\frac{\lg X_2 - \lg X_1}{m(S_1 - S_2)}. \qquad (33)$$

Формулы (30) — (33) введены для совершенных скважин. Однако при значениях $l/m < 0{,}1$ $l/m < 1/3$ (где l — длина рабочей части фильтра, m — мощность водоносного горизонта), что чаще встречается при откачках, они применяются и для несовершенных скважин, но с введением поправки на несовершенство скважин, предложенной Н. Н. Веригиным. Тогда формулы принимают следующий вид:

безнапорные воды, одиночная скважина

$$K = 0{,}732 \cdot Q\frac{(\lg R_п - \lg r) + 0{,}217\xi_0}{(2H - S)S}, \qquad (34)$$

безнапорные воды, при кустовых откачках

$$K = 0{,}732 \cdot Q\frac{(\lg X_2 - \lg X_1) + 0{,}217(\xi_1 - \xi_2)}{(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)}, \qquad (35)$$

напорные воды, одиночная скважина

$$K = 0{,}366Q\frac{(\lg R_п - \lg r) + 0{,}217\xi_0}{mS}, \qquad (36)$$

напорные воды, при кустовой откачке

$$K = 0{,}366Q\frac{(\lg X_2 - \lg X_1) + 0{,}217(\xi_1 - \xi_2)}{m(S_1 - S_2)}. \qquad (37)$$

В формулах (30) — (37) приняты следующие обозначения:

Q — дебит скважин при откачке, *м³/сутки*;
$R_п$ — приведенный радиус влияния, *м*;
r — радиус водоприемной части (фильтра) центральной скважины, *м*;
H — мощность безнапорного водоносного горизонта, *м*;
S — понижение уровня в центральной скважине, *м*;
X_1, X_2 — расстояние наблюдательных скважин от центральной, *м*;
S_1, S_2 — понижения в наблюдательных скважинах, *м*;
m — мощность напорного горизонта, *м*;
ξ — поправка на несовершенство скважин; находится по табл. 9.

Таблица 9

Значения

l/m	$m(r, X_1, X_2)$									
	0,5	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,1	0,00391	0,122	2,04	10,4	24,3	42,8	53,8	69,5	79,6	90,9
0,3	0,00297	0,0908	1,29	4,79	9,2	14,5	17,7	21,8	24,9	28,2
0,5	0,00165	0,0494	0,656	2,26	4,21	6,5	7,86	9,64	11,0	12,4
0,7	0,00546	0,0167	0,232	0,879	1,69	2,67	3,24	4,01	4,58	5,19
0,9	0,000048	0,0015	0,0251	0,128	0,3	0,528	0,664	0,846	0,983	1,12

Величины поправок по табл. 9 берутся в зависимости от отношения длины рабочей части фильтра l к мощности водоносного горизонта (соответственно для безнапорных H и напорных m) и отношения мощности водоносного горизонта m к величине r или X. При откачке из одиночной скважины при определении ξ_0 берется радиус фильтра центральной скважины (r), а при определении ξ_1 и ξ_2 — соответственно расстояния наблюдательных скважин от центральной (X_1 и X_2). При определении поправки для безнапорных вод мощность водоносного горизонта H уменьшается на половину понижения в центральной скважине (S). В случае, если фильтр центральной скважины незатопленный, его длина (l) уменьшается на половину длины осушенной части фильтра.

Радиус депрессии (фактический, а не приведенный) при установившемся режиме движения подземных вод при кустовой откачке (Q и S являются стабильными) определяется по формуле Дюпюи.

Для напорных вод

$$\lg R = \frac{S_1 \lg X_2 - S_2 \lg X_1}{S_1 - S_2}. \tag{38}$$

Для безнапорных вод

$$\lg R = \frac{S_1 (2H - S_1) \lg X_2 - S_2 (2H - S_2) \lg X_1}{(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)}. \tag{39}$$

При неустановившемся режиме приведенный радиус влияния определяется по формуле:

для безнапорных вод

$$R_п = 1{,}5\sqrt{a_y t}, \tag{40}$$

для напорных вод

$$R_п = 1{,}5\sqrt{at}, \tag{41}$$

где a_y — коэффициент уровнепроводности;

a — коэффициент пьезопроводности;

t — время от начала откачки.

Формулы (40) и (41) применяются при расчетах водозаборов и дренажных сооружений.

Коэффициент уровнепроводности характеризует способность водоносного пласта передавать изменение уровня подземных вод со свободной поверхностью (безнапорные воды). Определяется он по формуле:

$$a_y = \frac{K \cdot H_{ср}}{\mu} \ м^2/сутки, \tag{42}$$

где μ — водоотдача пласта.

Произведение $K \cdot H$ называют **водопроводимостью пласта.**

Коэффициент пьезопроводности характеризует разуплотнение воды и упругое расширение пород при понижении

давления в напорном пласте при откачке воды из скважины. Иначе, коэффициент пьезопроводности характеризует скорость распространения давления в напорном водоносном пласте при откачке при неустановившемся режиме, что обусловливается упругими свойствами воды и водоносной породы. Определяется коэффициент пьезопроводности по формуле:

$$a = \frac{K}{n\beta_в + \beta_п} \; м^2/сутки, \qquad (43)$$

где n — пористость водоносной породы;

$\beta_в$ — коэффициент объемной упругости воды; характеризует способность воды изменять объем при изменении давления;

$\beta_п$ — коэффициент объемной упругости водоносной породы.

Точно значения a_y и a определяются по данным откачек. Методика их определения изложена в специальных руководствах. Для наиболее часто встречающихся случаев a_y имеет значения 10^2—10^4 $м^2/сутки$ и a — 10^5—10^7 $м^2/сутки$.

Коэффициенты уровнепроводности и пьезопроводности используются при расчетах водозаборов в случае неустановившегося режима подземных вод, что преимущественно и наблюдается при длительных сроках работы водозаборов.

Ориентировочные значения величины радиуса влияния приведены в табл. 10.

Таблица 10

Ориентировочные значения величины радиуса влияния

Порода	Величина радиуса влияния, м
Супесчаные породы	10—20
Мелкозернистые и пылеватые пески	20—50
Разнозернистые и мелкозернистые глинистые пески	50—75
Неоднородные мелко-, средне-, крупнозернистые и разнозернистые пески	80—150
Гравийно-галечниковые породы со значительной примесью мелких частиц; среднезернистые однородные пески	100—120
Гравийно-галечниковые породы с незначительной примесью мелких частиц; крупнозернистые однородные пески	200—300
Скальные слаботрещиноватые породы	50—200
Скальные сильнотрещиноватые породы	300 и более

Расчет коэффициента фильтрации и других гидрогеологических параметров при откачках с неустановившимся режимом движения подземных вод производится по сложным формулам и излагается в специальных руководствах [7, 11, 45].

§ 49. Определение направления и скорости движения подземных вод

Фактически движение подземных вод в порах и трещинах горных пород в разных их частях происходит с различной скоростью. Где поры или трещины крупнее или где гидравлический уклон больше, там скорость движения также больше; в центральной части пор и трещин скорость перемещения воды бóльшая, нежели у поверхности частиц. Поэтому можно говорить лишь о средней скорости движения воды в пределах данной породы и при данном гидравлическом уклоне. Определение действительной скорости движения подземных вод, а также направления движения при естественных

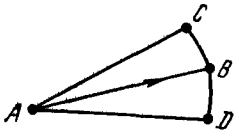


Рис. 46. Схема расположения буровых скважин при определении действительной скорости движения подземных вод

A — пусковая скважина; *B*, *C*, *D* — наблюдательные скважины

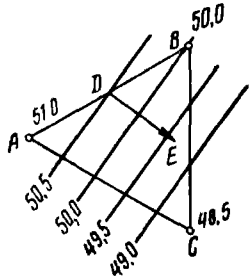


Рис. 47. Определение направления грунтового потока по трем скважинам

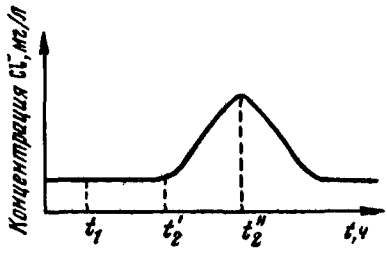


Рис. 48. График изменения концентрации иона хлора в подземных водах

t_1 — время введения соли; t_2' и t_2'' — соответственно время начала повышения концентрации иона хлора и его максимальной концентрации

уклонах осуществляется в полевых условиях, для чего используются различные индикаторы, которые изменяют либо цвет, либо химический состав, либо же электропроводность подземных вод. В качестве индикаторов используют вещества, ясно обнаруживаемые в воде, не вступающие в реакцию с веществами, находящимися в воде. Этим требованиям удовлетворяют хорошо растворимые хлористые соли натрия, лития, нашатырь, некоторые красители, радиоактивные вещества и др. Перед определением действительной скорости течения подземных вод участок, где намечается провести опытные работы, должен быть изучен в геологическом и гидрогеологическом отношениях, там необходимо определить химический состав подземных вод.

Для проведения опыта на выбранной площадке проходится шурф или бурится скважина, в которые затем запускается индикатор. Эти выработки называются пусковыми, или опытными. Для улавливания индикаторов вниз по течению устраиваются улавливающие, или наблюдательные, выработки (три-пять штук), которые обычно располагаются по направлению потока веерообразно (рис. 46).

До закладки пусковой и улавливающих скважин устанавливается общее направление движения подземных вод на опытном участке по карте гидроизогипс (при ее наличии) или нивелированием уровня воды по трем скважинам (рис. 47); на рисунке направление движения показывает линия DE, перпендикулярная к гидроизогипсам.

Расстояние между пусковыми и улавливающими выработками выбирают в зависимости от гранулометрического состава опробуемого водоносного горизонта. В супесях, лёссовидных суглинках и т. п. породах это расстояние равно 0,5—1,5 *м*, в мелкозернистых песках — 2—5 *м*, в крупнозернистых — 5—15 *м*, в трещиноватых породах — 10—15 *м*, в карстовых породах — до 50 *м*. Расстояния между улавливающими выработками равны 0,5—0,75 *м* для слабоводопроницаемых пород и 1—1,5 *м* для более водопроницаемых.

Зная расстояние между опытной и наблюдательной выработками l, время максимума индикаторной кривой t_2'', среднюю, или действительную, скорость движения потока, по В. М. Шестакову, определяют по формуле

$$V = \frac{l}{t_2''}. \tag{44}$$

Зная действительную скорость движения воды V и уклон I, можно ориентировочно определить коэффициент фильтрации из выражения

$$K = \frac{V}{I}. \tag{45}$$

Существует несколько методов обнаружения индикаторов в воде наблюдательных скважин. Чаще всего применяются химический, колориметрический, электролитический и геофизический методы.

Химический метод целесообразно применять при неглубоком залегании водоносного слоя. Основан он на применении в качестве индикатора иона хлора, вводимого в опытную скважину в виде раствора поваренной соли, либо хлористого аммония или хлористого лития. До начала опыта определяют содержание ионов хлора в подземной воде в естественных условиях и изменение этой концентрации примерно в течение суток, для чего отбирают пробы воды из опытной и наблюдательных выработок через каждые 2—3 *ч*.

Затем 5—15 *кг* хлористого натрия (3—5 *кг* хлористого аммония или 0,01—0,15 *кг* хлористого лития) растворяют в воде, извлеченной из опытной выработки. Перед выливанием раствора в опытную выработку из нее извлекается вода в объеме, немного превышающем объем раствора, чтобы исключить образование дополнительного напора в опытной выработке. После загрузки раствора из наблюдательных скважин отбирают пробы воды вначале через 2—5 *ч* (в зависимости от характера водопроницаемости пород), а затем через 15—30 *мин*. Отобранные пробы здесь же в поле титруют раствором азотнокислого серебра. Результаты определения концентрации ионов хлора изображаются в виде графика (рис. 48). Отбор проб воды проводят до наступления перелома в сторону уменьшения концентрации

индикатора после максимума. В зависимости от целей гидрогеологических исследований с графика (см. рис. 48) берут либо значение t'_2 (при расчете потерь из водохранилищ) либо t''_2 (при исследованиях для целей водоснабжения).

Колориметрический метод основан на использовании в качестве индикаторов красящих веществ. В щелочных водах применяются флюоресцеин, эозин, эритрозин, красная конго, флюорантрен; в кислых — метиленовая синька, анилиновая голубая, конго красная; в нейтральных — все перечисленные.

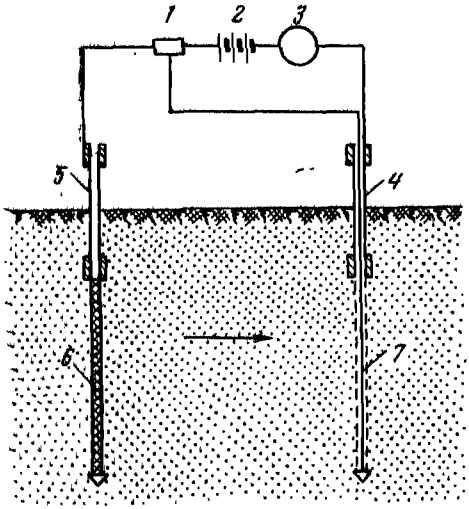


Рис. 49. Схема установки по определению скорости движения подземных вод электролитическим способом

1 — реостат; *2* — источник тока; *3* — миллиамперметр; *4* — наблюдательная скважина; *5* — пусковая скважина; *6* — фильтр; *7* — электрод

Красящие вещества растворяются либо в щелочи (нашатырный спирт), либо в слабой кислоте (уксусной). Пробы воды в наблюдательных скважинах берут в том же порядке, как и при химическом методе; только первая проба берется сразу же после запуска краски. Испытуемая проба воды в пробирке помещается в прибор — флюороскоп, представляющий собой ящик со стандартными образцами проб воды, с которыми и сравнивается вода, отобранная из наблюдательных скважин. Результаты обрабатываются в виде графиков (см. рис. 48).

Электролитический метод является разновидностью химического, только при этом определяется изменение электропроводности подземных вод, увеличивающейся при введении солей (электролитов). В качестве соли в первую очередь рекомендуется хлористый амоний, наиболее удовлетворяющий требованиям опыта, а затем поваренная соль. Наблюдения за передвижением электролита между выработками и прохождением его через наблюдательные скважины осуществляется при помощи специального оборудования (рис. 49). Опыт начинают с измерения силы тока в естественных условиях, после чего в опытную скважину вводят электролит и по показаниям миллиамперметра измеряют увеличение силы тока, обусловленное понижением электросопротивления воды в связи с вводом электролита. Электролитический способ применим только для слабо минерализованных вод. Обработки результатов ведут как и при описанных способах, откладывая на ординате силу тока в амперах.

Геофизические методы. В последнее время все большее распространение получают геофизические способы определения скорости и направления движения подземных вод, которые дают точные результаты при невысокой минерализации вод.

Новейшие достижения физики дали возможность определять направление движения подземных вод и скорости их движения с помощью радиоактивных изотопов [36], для чего применяется преимущественно тритий, который обнаруживается в подземных водах в ничтожных количествах.

§ 50. Движение подземных вод к водозаборным сооружениям

Теория движения подземных вод к водозаборным сооружениям разработана применительно к определению притока воды к вертикальным и горизонтальным водозаборам.

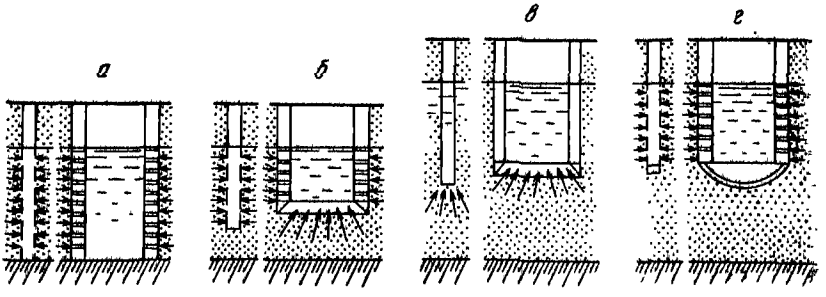


Рис. 50. Типы грунтовых колодцев (по Г. Н. Каменскому)

а — совершенные колодцы; *б* — несовершенные колодцы с проницаемыми стенками и дном; *в* — несовершенные колодцы с непроницаемыми стенками и проницаемым дном; *г* — несовершенные колодцы с проницаемыми стенками и непроницаемым дном

К вертикальным водозаборам относятся буровые скважины, колодцы, шурфы и вертикальные стволы шахт, к горизонтальным — осушительные канавы, закрытые дренажи, каптажные галереи, штреки и др. Вертикальные водозаборы любого назначения, вскрывающие грунтовые и безнапорные межпластовые воды, носят общее название грунтовые колодцы, а водозаборы, вскрывающие напорные воды, называются артезианскими колодцами. Грунтовые и артезианские колодцы могут быть совершенными и несовершенными. Типы грунтовых колодцев приведены на рис. 50.

Совершенными называются колодцы, доведенные до водоупора и имеющие проницаемые стенки в пределах всей мощности водоносного пласта (см. рис. 50, *а*). Несовершенными называются колодцы, не доведенные до водоупорного ложа (см. рис. 50, *б*, *в*, *г*).

Грунтовый совершенный колодец. Если из грунтового совершенного колодца проводить откачку, то уровень воды в колодце начнет понижаться, а водоносный пласт около

колодца будет осушаться. В результате при понижении уровня воды в колодце на величину S около него образуется пониженная поверхность грунтовых вод, имеющая форму воронки радиусом R, называемая депрессионной (рис. 51); ось ее совпадает с осью колодца.

Если в пределах депрессионной воронки на расстоянии x от центра колодца провести сечение, то площадь F этого цилиндрического сечения с ординатой y, будет равна

$$F = 2\pi \cdot x \cdot y. \tag{46}$$

Согласно линейному закону фильтрации расход воды в сечении F равен

$$Q = F \cdot K \cdot I. \tag{47}$$

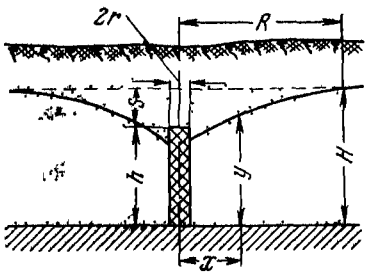


Рис. 51. Схема совершенного грунтового колодца

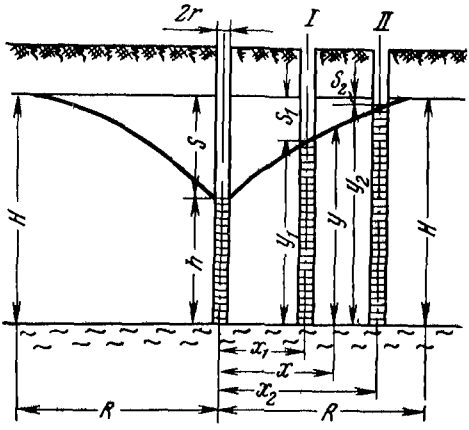


Рис. 52. Расчетная схема для определения дебита грунтового колодца

Гидравлический градиент (уклон кривой депрессии) в дифференциальной форме

$$I = \frac{dy}{dx}.$$

Следовательно,

$$Q = 2\pi \cdot x \cdot y \cdot \frac{dy}{dx}. \tag{48}$$

Разделяя переменные и интегрируя в пределах от сечения I до сечения II (рис. 52)

$$\frac{Q}{2\pi K} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x} = \int_{y_1}^{y_2} y \cdot dy,$$

получим

$$\frac{Q}{2\pi K} \cdot \ln \frac{x_2}{x_1} = y_2^2 - y_1^2. \tag{49}$$

Полученное уравнение представляет собой уравнение кривой депрессии при откачке воды из совершенного колодца и было выведено Дюпюи в 1868 г.

Если принять $x_1 = r$ (радиус фильтра колодца), $x_2 = R$ (радиус воронки депрессии), $y_1 = h$ (столб воды в колодце считая от водоупора), $y_2 = H$ (превышение статического уровня над водоупором), то на основе формулы (49) получим

$$H^2 - h^2 = \frac{Q}{2\pi K} \ln \frac{R}{r} \tag{50}$$

или

$$Q = 2\pi K \cdot \frac{H^2 - h^2}{\ln R - \ln r}. \tag{51}$$

Если обозначить понижение уровня воды в колодце через S, то $H^2 - h^2 = (2H - S)\,S$. Тогда

$$Q = 2\pi K \frac{(2H - S)\,S}{\ln R - \ln r}. \tag{52}$$

Заменив натуральные логарифмы десятичными и подставив числовое значение π, получим формулу Дюпюи для определения притока воды в совершенный безнапорный колодец в более удобном для использования виде:

$$Q = 1{,}36 \cdot \frac{(2H - S)\,S}{\lg R - \lg r}. \tag{53}$$

Формула (53) широко используется для расчета дебита совершенных одиночных грунтовых колодцев по заданному понижению S.

Грунтовые несовершенные водозаборы. Дебит несовершенных водозаборов меньше дебита совершенных. Различают два типа несовершенных водозаборов: с незатопленным фильтром, когда депрессионная кривая пересекает рабочую часть фильтра, и с затопленным фильтром, когда депрессионная кривая находится выше рабочей части (сюда относятся также и артезианские несовершенные колодцы). Дебит несовершенных водозаборов определяется по различным сложным формулам, приведенным в специальных руководствах [1, 5, 7, 11, 40, 43, 45, 49].

Артезианская совершенная скважина. При откачке воды из артезианской скважины вода будет притекать к ней со всех сторон в пределах пласта мощностью M (рис. 53).

Уровень воды в скважине понизится на величину S и столб воды будет равен h, считая от водоупорного ложа. Около скважины образуется депрессионная воронка понижения напора радиусом R, аналогичная по форме депрессионной воронке в грунтовых колодцах.

По линейному закону фильтрации

$$Q = K \cdot F \cdot I, \tag{54}$$

где F — площадь поперечного сечения напорного потока, которая на расстоянии x равна $2\pi \cdot x \cdot M$.

Учитывая, что

$$I = \frac{dy}{dx},$$

получим

$$Q = 2\pi \cdot K \cdot M \cdot x \frac{dx}{dy}. \qquad (55)$$

Интегрируя это уравнение в пределах сечений *I* и *II* (рис. 54) получим

$$\int_{y_1}^{y_2} dy = \frac{Q}{2\pi KM} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x},$$

откуда

$$Q = \frac{2\pi K \cdot M \cdot (y_2 - y_1)}{\ln x_2 - \lg x_1}. \qquad (56)$$

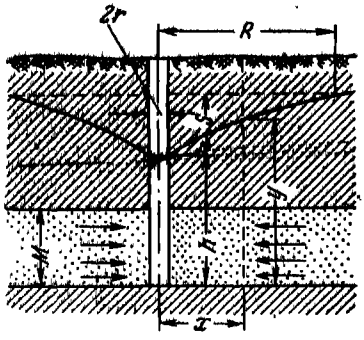


Рис. 53. Приток воды к артезианской совершенной скважине

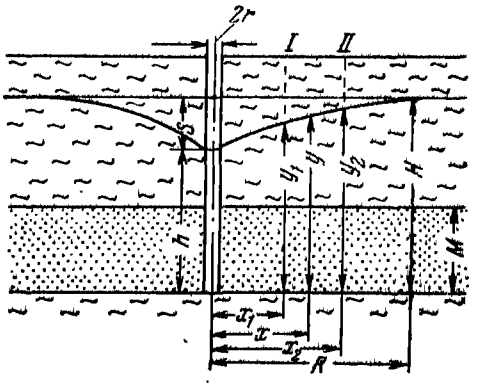


Рис. 54. Расчетная схема для вывода уравнения расхода артезианской скважины

Приравнивая $x_1 = r$, $x_2 = R$, $y_1 = h$, $y_2 = H$ (напор), получим формулу Дюпюи для определения дебита артезианской совершенной скважины:

$$Q = \frac{2\pi \cdot K \cdot M\,(H - h)}{\ln R - \ln r}. \qquad (57)$$

Поскольку $H - h = S$, то, переходя к десятичным логарифмам, получим расчетную формулу в наиболее удобном для пользования виде:

$$Q = \frac{2{,}73 \cdot K \cdot M \cdot S}{\lg R - \lg r}. \qquad (58)$$

Если разделить дебит Q на понижение S, получим так называемый удельный дебит скважины q:

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{2{,}73 \cdot K \cdot M}{\lg R - \lg r}. \qquad (59)$$

Удельный дебит скважины позволяет вычислить количество воды, которое может поступать в скважину при заданном понижении

и часто используется при гидрогеологических расчетах притока воды в скважину, ствол шахты и т. п.

Дебит несовершенного артезианского колодца также определяется по различным сложным формулам, приведенным в тех же руководствах [1, 5, 7, 11, 40, 43, 45, 49].

Приток воды к горизонтальным водозаборам. Горизонтальные водозаборы также могут быть совершенными, т. е. вскрывать водоносный пласт на всю его мощность, и несовершенными, когда ими вскрывается только часть водоносного пласта.

Приток воды в совершенный горизонтальный водозабор (рис. 55), отнесенный к 1 *м* его длины, или единичный расход, определяется по формуле

$$q = K\frac{H^2 - h^2}{R}. \qquad (60)$$

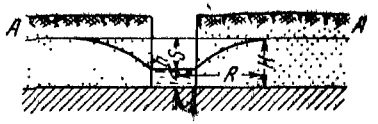


Рис. 55. Схема притока воды в совершенный горизонтальный водозабор

Для водозабора длиной L приток будет равен

$$Q = qL.$$

Если приток воды будет только с одной стороны водозабора, то величину Q надо уменьшить вдвое.

Дебит несовершенных горизонтальных водозаборов определяется по сложным формулам, приводимым в специальных руководствах [5, 40, 43, 45].

Горизонтальные водозаборные сооружения нашли самое широкое применение в промышленном и городском строительстве в целях общего благоустройства и оздоровления санитарной обстановки, предотвращения подтопления или борьбы с подтоплением подземных сооружений и коммуникаций, улучшения строительных свойств грунтов в основании сооружений и других целей.

§ 51. Понятие о взаимодействии водозаборов

При эксплуатации подземных вод, а также при проведении дренажа и осушении месторождений скважины и другие искусственные дренажные выработки располагаются обычно группами на расстоянии меньше двух радиусов влияния. В этих условиях они взаимодействуют.

Взаимодействие водозаборов выражается в снижении дебитов (по сравнению с дебитами тех же водозаборов и при тех же динамических уровнях, но работающих при отсутствии взаимодействия), динамических уровней (при неизменных дебитах) или в одновременном изменении и дебитов и уровней, что преимущественно и наблюдается.

Интенсивность и характер взаимодействия водозаборов зависят от многих естественных и искусственных факторов: водопроницаемости пород, мощности и ширины подземного потока, положения

водоупорного ложа, условий питания и разгрузки водоносного горизонта, взаимосвязи со смежными водоносными горизонтами, взаимного расположения водозаборов, их количества, конструкции фильтров, совершенства водозаборов и др. Взаимодействующие водозаборы располагаются линейно (преимущественно нормально к направлению потока подземных вод), по контурам геометрической фигуры (по кругу, в вершинах многоугольников и т. п.) или в каком-либо ином порядке. Учитывая одновременное влияние многих факторов, расчет взаимодействующих водозаборов осуществляется методом подбора, в результате чего и устанавливаются нужное количество выработок, их наиболее рациональное расположение, конструкции и уточняются другие вопросы. Расчет взаимодействующих водозаборов в каждом конкретном случае является сложной задачей и решается разнообразными методами, подробно излагаемыми в специальных руководствах [1, 7, 17, 18, 40, 43, 45, 49].

§ 52. Понятие о методах моделирования при гидрогеологических расчетах

В настоящее время при решении многих задач, связанных с решением вопросов водоснабжения или дренирования стройплощадок, карьеров, шахтных полей и других объектов, гидрогеологические расчеты проводятся с широким применением приборов, моделирующих природные гидрогеологические условия. Наибольшее распространение получили метод ЭГДА, электро- и гидроинтеграторы.

Метод ЭГДА — электрогидродинамических аналогий — нашел широкое применение при изучении вопросов фильтрации в основании и в обход гидротехнических сооружений, при решении вопросов водоснабжения, оценки притоков воды в горные выработки, проектировании различных водопонизительных установок и т. п. Метод ЭГДА может применяться для моделирования как установившихся, так и неустановившихся потоков. Метод ЭГДА основан на аналогии между явлением ламинарной установившейся фильтрации воды и прохождением тока в электропроводящей среде, которой служит либо электропроводная бумага, либо жидкие электролиты. Метод ЭГДА, впервые разработанный акад. Н. Н. Павловским, подробно излагается в работах Н. И. Дружинина, П. Ф. Фильчакова и др.

Электроинтеграторы представляют собой сеточные модели с сосредоточенными сопротивлениями в так называемых узлах моделей. В сеточных моделях сочетаются принципы счетно-решающих устройств и электрических моделей. Современные электроинтеграторы позволяют выполнять самые сложные гидрогеологические расчеты для условий как установившегося, так и неустановившегося движения. Решение задач основывается на аналогии между явлениями исследуемого физического процесса (движение воды в горных породах) и электрическими явлениями в узлах электроинтегратора, в которых сосредоточены электрические сопротивления,

соответствующие сопротивлениям отдельных участков рассматриваемого гидрогеологического района. Для успешного решения гидрогеологических задач с помощью электроинтегратора необходимо задаваться начальными и граничными условиями, соответствующими природным особенностям территории, по которой проводятся необходимые гидрогеологические расчеты. Описание электроинтеграторов и методики работ на них изложены в работах Л. И. Гутенмахера, У. Карплюса, В. М. Шестакова и др.

Гидравлические интеграторы (системы В. С. Лукьянова) представляют собой приборы, в которых электрические сопротивления заменяются гидравлическими сопротивлениями. Для задания граничных условий служит специальная установка с подвижными водосливами, с помощью которых можно задавать любые условия, соответствующие реальной обстановке. Описание гидравлических интеграторов изложено в работах В. С. Лукьянова, М. А. Вевиоровской и др.

ГЛАВА XV

ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 53. Общие сведения

Одними из основных задач инженерной геологии являются изучение и оценка геологических факторов, влияющих на условия строительства и эксплуатацию сооружений. Одним из существенных геологических факторов, влияющим на выбор стройплощадки для возведения конкретного сооружения, на его конструкцию, технологию производства строительных работ и т. п., являются физико-геологические процессы и явления, под которыми понимаются природные процессы и явления, изменяющие вещественный состав горных пород, их физико-механические свойства и земную поверхность. При изучении физико-геологических процессов в инженерно-геологических целях им дается не общая качественная характеристика, как в общей геологии, а количественная, с точки зрения их значимости для конкретного строительного объекта, возводимого в определенных природных геологических условиях. С учетом степени опасности имеющихся в районе предполагаемого строительства физико-геологических явлений осуществляются различные профилактические инженерные мероприятия, предотвращающие воздействие этих явлений на возведенные сооружения и обеспечивающие их сохранность на весь период эксплуатации.

Инженерно-геологическое изучение физико-геологических процессов осуществляется методами, принятыми в динамической геологии, а также специально разрабатываемыми в инженерной геологии.

Наибольшее значение при этом придается полевым опытно-исследовательским работам, стационарному изучению физико-геологических процессов и различным расчетам, дающим цифровые показатели изучаемым процессам, которые затем кладутся в основу проектирования различных защитных сооружений.

Существуют многочисленные классификации физико-геологических явлений, приводимые в специальной литературе [20, 44 и др.].

§ 54. Явления, связанные с деятельностью поверхностных вод

Поверхностные воды морей, озер, рек, временных потоков производят на поверхности суши огромную разрушительную работу, обусловливая размыв и обрушение пород на склонах, смыв продуктов выветривания с поверхности суши, переработку и транспортировку продуктов выветривания. Все эти процессы необходимо изучать, так как подмыв и обрушение берегов вызывают разрушение расположенных на берегу сооружений, зданий, дорог, дамб, причальных стенок, портовых сооружений и т. п.

В соответствии с природной обстановкой, факторами и формами проявления деятельность поверхностных вод подразделяется на морскую и озерную абразию, речную эрозию, сели (сили), эрозию почв. Для инженерно-геологических целей эрозия почв не изучается, так как никакого влияния на сооружения она не оказывает.

М о р с к а я и о з е р н а я а б р а з и я. Основными факторами, воздействующими на берега морей и озер, являются динамическое воздействие волн, морские течения, растворяющее действие воды, плавающие льдины, увлажнение пород и др. Сила воздействия волн на берега может достигать 3 $кГ/см^2$. Интенсивность разрушения берега морскими волнами зависит от многих факторов: конфигурации и крутизны берегов, их геологического строения, характера волн (их высоты и длины) и скорости движения, наличия (или отсутствия) пляжа, характера эпейрогенеза, наличия искусственных сооружений и др.

О характере скорости разрушения берегов под действием морских волн в сочетании с другими факторами свидетельствуют следующие данные. В районе Одессы ежегодно размывается в среднем 0,93 *м* берега, в районе Ламанша — полоса берега шириной 2 *м*, в пределах графства Суссекс (Англия) средняя ежегодная скорость разрушения берега за последние 110 лет составила 4—5 *м*.

В настоящее время разработаны достаточно эффективные меры, полностью или частично предотвращающие морскую и озерную абразию [20, 33]. В принципе эти мероприятия сводятся к защите берегов от действия морских волн искусственными сооружениями — волноломами и бунами; к стабилизации земляных масс аккумуляцией наносов — искусственным п л я ж е о б р а з о в а н и е м.

Р е ч н а я э р о з и я. Геологическая деятельность рек заключается в разрушении горных пород водным потоком, что приводит

к углублению и расширению русла (эрозия), в переносе продуктов разрушения (транспортирующая деятельность рек) и отложении продуктов разрушения (аккумулирующая деятельность рек). Изучение закономерностей формирования речных долин и влияния различных процессов, проявляющихся в долинах рек, на инженерную деятельность человека, в частности на условия возведения и устойчивость различных сооружений, имеет существенное практическое значение.

Из физико-геологических процессов по долинам рек чаще всего встречаются подмыв берегов и оползни (ниже). Подмывающая деятельность рек наиболее интенсивно проявляется в период паводков, что приводит к обрушению берегов и разрушению находящихся поблизости сооружений (рис. 56). Наиболее легко и интенсивно подмываются и разрушаются высокие берега, сложенные рыхлыми породами; супесями, суглинками и т. п. Для защиты отдельных участков долины реки от подмыва и разрушения применяются различные инженерные мероприятия, регулирующие размывающую деятельность рек. В принципе они аналогичны защитным гидротехническим продольным сооружениям, возводимым по берегам морей. Широко применяются также водозащитные дамбы и струеотклоняющие сооружения.

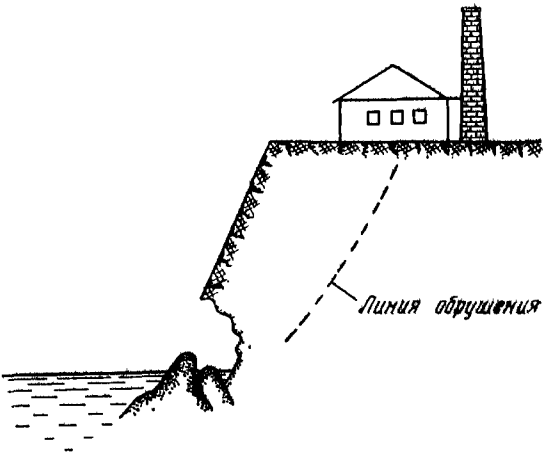


Рис. 56. Обрушение склона реки в результате подмыва

Оврагообразование — процесс размыва и переноса продуктов размыва временными водотоками, в результате чего на поверхности земли образуются углубления различной формы. Оврагообразование оказывает самое отрицательное воздействие на различные сооружения и особенно на сельское хозяйство, значительно усиливая эрозию почв. Основными факторами, обусловливающими оврагообразование, являются: крутизна и форма склонов; состав пород, слагающих склон; климатические условия; деятельность человека — распашка склонов, устройство каиав, уничтожение растительности на склонах и вблизи них и т. п.

Мерами борьбы с оврагообразованием являются различные мероприятия агротехнического, лесомелиоративного и гидротехнического характера, осуществление которых должно проводиться комплексно и дифференцировано по зонам.

С е л и — бурные временные грязекаменные, грязещебнистые или грязевые потоки, возникающие в горных районах во время ливня или при интенсивном таянии снега. Условиями, способствующими образованию селей, являются: горный рельеф, обусловливающий большую скорость движения потока; континентальный засушливый климат; наличие в селевом бассейне горных пород, легко поддающихся выветриванию; сильные ливни или интенсивное таяние снега. Как правило, сели по отдельным долинам проходят не ежегодно, а через 2—4 года, а катастрофические один раз в 10—15 лет.

Грязекаменный поток, несущийся с большой скоростью, нередко достигающий 10—15 *м/сек*, по пути своего движения производит большие разрушения: сносятся здания, мосты, разрушается и заваливается земляное полотно дорог, заносятся отверстия искусственных сооружений, приводятся в негодность пашни, сады, гибнут животные и нередко люди.

Мощность селевого потока иногда достигает 20 *м*, составляя в большинстве случаев 4—5 *м*. Содержание обломочного материала в селевой массе превышает 100 *кг* на 1 $м^3$ воды, достигая нередко половины и больше общего объема. Селевые паводки выносят на равнины огромное количество обломочного материала, начиная от мелкодисперсного глинистого до глыб объемом 80—127 $м^3$. После прохождения селя местность покрывается слоем жидкой грязи мощностью 1—1,5 *м* и более и многочисленными крупными обломками. При этом на долгий срок выходят из эксплуатации пашни, сады, дороги, улицы поселений и т. п.

В СССР сели проявляются преимущественно на Кавказе и в Средней Азии, реже и в меньших масштабах на Карпатах, в Крыму, на Урале, в Прибайкалье и других местах.

В зависимости от природных особенностей мест, где проявляются сели, профилактические мероприятия бывают самыми разнообразными. Главнейшими из них являются: лесонасаждение и травосеяние на площади селесборного бассейна; устройство регуляционных сооружений на пути движения селя (дамб, траверс, полузапруд, селеуловителей и т. п.). Для защиты железных и автомобильных дорог часто устраиваются так называемые с е л е с п у с к и — каменные или железобетонные лотки нужной пропускной способности, устраиваемые над дорогой. Иногда более целесообразно устройство туннеля или однопролетного моста нужной протяженности.

Вообще борьба с селями очень трудна. Выбор мероприятий и сооружений для борьбы с селями должен проводиться с учетом местных природных условий, что устанавливается по результатам инженерно-геологических исследований, проводимых в селеопасных районах.

§ 55. Явления, связанные с деятельностью поверхностных и подземных вод на склонах

Под совокупным воздействием различных факторов на естественных склонах и искусственных откосах проявляются различные деформации, из которых наиболее распространены осыпи, осовы, обвалы и оползни.

О с ы п и и о с о в ы — скопления обломков горных пород у основания и в нижней части крутых склонов. Образуются осыпи в результате выветривания горных пород в горных областях. Образующиеся при выветривании обломки постепенно смещаются вниз по склону без всякой сортировки. Осыпь состоит из угловатых обломков пород разного размера: от песчинок до глыб объемом в несколько кубических метров. Мощность осыпей изменяется от долей метра до многих метров, достигая нередко 30—40 *м*. Поверхность осыпи представляет собой естественный откос крутизной от нескольких градусов до 30—40°.

Смещение отдельных участков осыпи, насыщенной водой, называется о с о в а м и. Последние проявляются обычно на склонах, сложенных породами глинистого состава (глинистыми сланцами, опоками, мергелями и т. п.).

В случае выветривания прочных скальных пород (гранитов и др.) на склонах и у их подножий накапливается очень грубообломочный материал, называемый к у р у м а м и (каменные осыпи). Накопление грубообломочного материала на горизонтальных или почти горизонтальных террасах, плато и нагорьях называется к а м е н н ы м и р о с с ы п я м и. Образуются россыпи обычно в горных районах в условиях жаркого засушливого климата и занимают нередко площади в десятки квадратных километров. Они неподвижны, но крайне осложняют строительство и передвижение любого транспорта, а нередко местность из-за них совершенно непроходима.

Осыпи встречаются во всех горных районах СССР. В Крыму и на Карпатах их размеры незначительны и причиняемый ими вред невелик. В других горных районах страны осыпи затрудняют строительство и эксплуатацию автомобильных и железных дорог. Гигантские по площади осыпи, чаще в виде курумов, имеются в Кузнецком Алатау, в Прибайкалье и Забайкалье, в горах Якутии и Приморья и в других местах.

О б в а л ы — отрыв и падение с естественных склонов или с откосов выемок как отдельных небольших камней, так и колоссальных масс каменного материала. При движении камни опрокидываются, дробятся и скатываются вниз по склону. Обвалы происходят обычно в горных районах на крутых и обрывистых склонах, на крутых морских побережьях и сравнительно редко на склонах глубоко врезанных речных долин. Гигантские обвалы наблюдаются редко, но их следы сохраняются надолго. В 1911 г. на р. Мургаб на Памире в результате землетрясения произошел обвал и на реке образовалась плотина высотой свыше 500 *м*, что обусловило образование озера, существующего до сих пор. Мелкие обвалы в горных районах происходят очень часто и причиняют большой вред автомобильным и железнодорожным магистралям.

Причины образования обвалов — это ослабление прочности и целостности горных пород под влиянием процессов выветривания. Тем самым обвалы являются следствием естественных геологических

процессов. Для борьбы с обвалами применяются различные инженерные противообвальные сооружения (рис. 57).

О п о л з н и — движение масс горных пород вниз по естественному склону или искусственному откосу под действием силы тяжести по ясно выраженной поверхности скольжения, связанное во многих случаях с деятельностью поверхностных и подземных вод (по Н. Ф. Погребову). Оползни чрезвычайно широко распространены в природе и нередко проявляются в грандиозных масштабах. На территории СССР оползни зарегистрированы в самых различных районах и причиняют народному хозяйству огромный вред, деформируя полотно железных дорог, мосты, ценные в лечебном отношении территории.

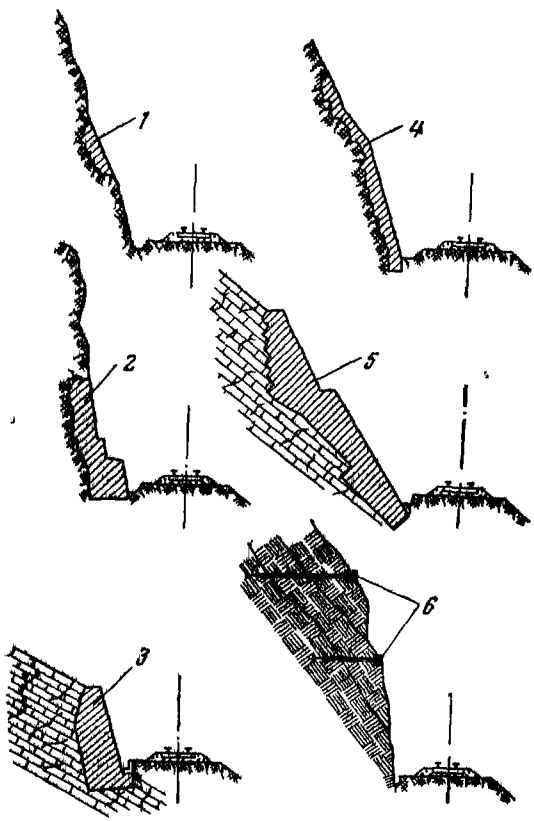


Рис. 57. Виды противообвальных сооружений
1 — заделка вывала; *2* — поддерживающая стена; *3* — подпорная стена; *4* — облицовочная стена; *5* — контрфорс; *6* — анкеровка неустойчивых пластов

Оползни в карьерах возникают как под влиянием общих факторов (см. ниже), так и горнотехнических: при несоответствии между высотой рабочих уступов в карьере h_1, h_2, h_3 и их крутизной α_1, α_2, α_3 или угла рабочего борта β физико-механическим свойствам пород, слагающим уступы (рис. 58), откосы деформируются.

В карьерах оползни часто проявляются на откосах внутренних отвалов в случае, если угол откоса α при данной высоте отвальных масс h превышает критический. Оптимальные значения высоты уступов в карьерах определяются применяемыми землеройными механизмами, а углы откосов α — расчетами, в основу которых кладутся показатели физико-механических свойств разрабатываемых пород. Следует только учитывать изменяемость показателей свойств пород во времени под влиянием различных причин. В основу расчетов кладутся наиболее низкие значения углов внутреннего трения и сцепления и наиболее высокие значения объемного веса, которые являются

основными параметрами при расчете устойчивости откосов в карьерах.

Процессы, вызывающие оползневые явления, обусловливаются сочетанием целого ряда естественных и часто искусственных факторов, в совокупности нарушающих устойчивость горных пород, слагающих естественный склон или искусственный откос. Основными из этих факторов являются: геоморфология склона (высота, крутизна, форма); геологическое строение склона (литологический состав пород, формы и условия залегания пластов, тектонические особенности склона); свойства пород, слагающих склон; гидрогеологические условия склона, обусловливающие возможность проявления гидродинамического и гидростатического давления на породы склона; интенсивность размывающей деятельности поверхностных

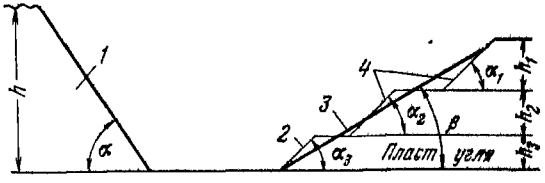


Рис. 58. Схема карьера
1 — внутренний отвал; *2* — выемочный уступ; *3* — борт карьера; *4* — рабочие уступы

вод (речных, озерных морских); интенсивность процессов выветривания, снижающих целостность и прочность горных пород, их измельчение, образование трещин и т. п.; увеличение веса пород при их увлажнении осадками или при искусственном поливе; подрезка склона при строительстве дорог, каналов и т. п.; отсыпка вблизи склона отвалов горных пород, шлаков, насыпей, строительство других объектов, нарушающих статическое состояние склонов; динамические воздействия — землетрясения от движущихся вблизи склона поездов, работающих поблизости механизмов (бетономешалки и т. п.), удары волн, воздействие взрывов при ведении горных работ и т. п.; работы, увеличивающие крутизну склона.

Множество причин образования оползней в их сложном сочетании и взаимодействии значительно усложняют борьбу с ними и часто требуют применения целого комплекса противооползневых мероприятий. Обоснованный выбор последних может быть сделан только по результатам тщательно проведенных инженерно-геологических исследований оползневых участков. Следует при этом иметь в виду, что условия, обусловливающие возможность проявления оползневых подвижек на склоне, накапливаются постепенно, иногда в течение значительного промежутка времени, пока какой-либо, иногда незначительный повод не приведет к нарушению устойчивости склона. Поэтому при ведении изыскательских работ надо устанавливать основные причины, способные вызвать подвижки горных пород на склоне в конкретных природных условиях и соответственно им осуществлять затем защитные мероприятия.

При изучении оползней существенное значение имеет установление м о р ф о л о г и и оползней, которая бывает самой разнообразной

и зависит от состава пород, слагающих склон, условий их залегания, сочетания оползнеобразующих факторов и других причин. В каждом оползне различают морфологические элементы (рис. 59).

Противооползневые мероприятия. В зависимости от причин и факторов, обусловливающих возникновение и развитие оползневых процессов, осуществляются самые разнообразные противооползневые мероприятия, придающие склонам нужную устойчивость и тем самым предохраняющие сооружения и ценные территории от разрушений. Противооползневых мероприятий существует много, большинство из них представляют собой сложные сооружения, которые требуют затрат значительных средств и времени на их возведение и затем тщательного надзора за их

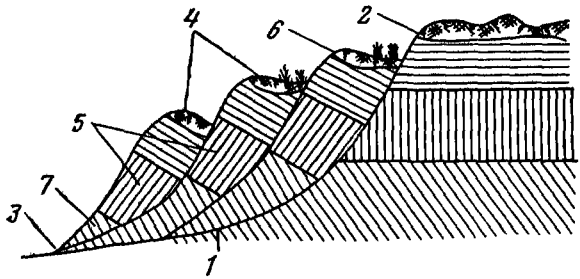


Рис. 59. Схема оползня
1 — поверхность скольжения; 2 — надоползневой уступ; 3 — бавис (подошва) оползня; 4 — оползневые террасы; 5 — тело оползня; 6 — голова оползня; 7 — язык оползня

исправным состоянием. Поэтому выбор противооползневых мероприятий должен быть глубоко обоснованным в результате тщательного и всестороннего изучения оползневых явлений, проявляющихся в конкретных природных условиях. Борьба с оползнями должна быть комплексной и состоять из ряда мероприятий, способных устранять причины, обусловливающие неустойчивость горных пород на склонах. В первую очередь противооползневые мероприятия должны быть направлены на устранение главных, основных причин. В целом все многочисленные мероприятия по борьбе с оползнями подразделяются на профилактические и коренные.

Профилактические, или *пассивные*, мероприятия имеют своей целью: предотвращение излишнего увлажнения оползневых склонов поверхностными водами в результате устройства нагорных канав, лотков, лесомелиоративных насаждений на склонах и т. п.; упорядочение строительства вблизи склонов автомобильных и железных дорог, тяжелых сооружений, каналов, цветников; предотвращение подрезки склонов, запрещение вблизи оползневых участков проведения взрывных и горных работ и т. п.; запрещение вблизи неустойчивых склонов сбрасывать строительный мусор, шлаки, устраивать отвалы при ведении горных работ и т. п.; ограничение в необходимых случаях скорости движения поездов вблизи оползневого участка; недопущение вырубки древесно-кустарниковой растительности и уничтожения травяного покрова; осуществление строго рационального полива огородов, садов и цветников вблизи склонов с целью недопущения излишнего их увлажнения.

Коренные, или *активные*, мероприятия преследуют цель устранить причины, вызывающие оползневые явления. Поскольку одной из частых причин оползнеобразования является подмывающая деятельность поверхностных вод, для устранения этого возводят дамбы, струеотклоняющие сооружения, волноломы, буны и т. п. Подземные воды, выходящие на склонах, также часто обусловливают неустойчивость

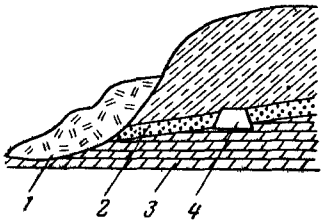


Рис. 60. Штольня, расположенная в водопроницаемом пласте для перехвата подземных вод четвертичного водоносного горизонта

1 — оползневые накопления; *2* — водоносный слой; *3* — коренные породы; *4* — штольня

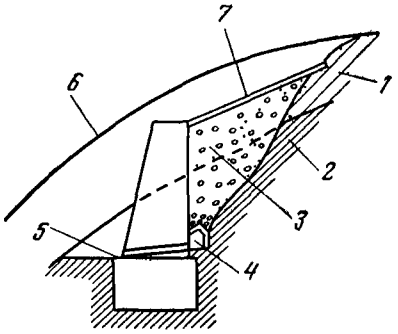


Рис. 61. Противооползневая подпорная стенка

1 — оставшаяся часть оползня; *2* — коренные породы; *3* — дренажная засыпка пазухи, *4* — дренаж, *5* — вывод воды; *6* — поверхность оползня; *7* — гидроизоляция

склонов; для предохранения склонов от отрицательного воздействия подземных вод устраивают дренажные сооружения различной конструкции (рис. 60), не допускающие выход подземных вод на склонах. Широко применяются также механические способы укрепления склонов устройством подпорных стенок (рис. 61), контрбанкетов, забивкой свай. Нередко устойчивость оползневых склонов достигается соответствующей их планировкой, устройством контрбанкета, срезкой более крутой верхней части склона и отсыпки у основания склона срезанной части земляных масс или доставки материала извне для устройства пригрузки у основания склона (рис. 62). Существенным противооползневым мероприятием является мелиорация пород, слагающих склон (силикатизация, смолизация, электрохимические способы, цементация, термическое закрепление), что значительно увеличивает сопротивление пород сдвигающим усилиям.

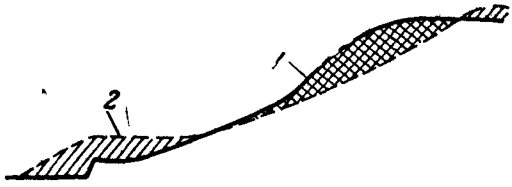


Рис. 62. Укрепление оползневого склона путем уполаживания откоса и устройство контрбанкета

1 — срезка; *2* — контрбанкет

Понятие о методах оценки устойчивости оползневых склонов. Равновесие пород, слагающих естественные и искусственные склоны, зависит от сочетания целого ряда описанных естественных и искусственных факторов. Оценка устойчивости склона представляет собой очень сложную задачу. В практике исследований и проектирования разработаны следующие основные способы оценки устойчивости естественных и искусственных склонов: 1) нормативных данных; 2) инженерно-геологических аналогий; 3) расчетные механико-математические способы.

Способ нормативных данных широко применяется при оценке устойчивости искусственных откосов, особенно при строительстве дорог. Основан он на данных многолетних наблюдений за поведением откосов в породах различных типов, работающих в различных условиях (сухие откосы, подводные, откосы насыпей, окопов, траншей и т. п.). Эффективность применения способа нормативных данных зависит от правильности определения состава пород, слагающих склоны, и их физико-механических свойств и условий работы склона, в соответствии с чем и устанавливается предельный угол заложения, обеспечивающий устойчивость откоса. Способ нормативных данных является разновидностью метода инженерно-геологических аналогий.

Способ инженерно-геологических аналогий. Применение этого метода основано на учете: физико-механических свойств пород, слагающих склоны, и их изменений во времени; геолого-литологического и геоморфологического строения склонов; обводненности пород и роли поверхностных и подземных вод в разрушении склонов; влияния климатических условий на устойчивость склонов; геологической истории формирования склонов; влияния современных геологических процессов на состояние склонов; эффективности примененных защитных мероприятий, обеспечивающих устойчивость склонов. Сопоставляя все эти данные на изучаемом склоне с данными откоса, где природные условия аналогичные и где уже эксплуатируются те или другие сооружения, и дается соответствующая оценка условий его устойчивости в процессе эксплуатации построенных сооружений (насыпей, выемок, каналов и т. п.). При правильном обоснованном применении способа аналогий надежность его очень высокая.

Расчетные механико-математические способы. Известные в настоящее время расчетные методы более или менее успешно используются пока только для оценки степени устойчивости склонов, сложенных песчано-глинистыми породами. Успех применения расчетных методов оценки устойчивости склонов зависит от следующих факторов: выбора расчетной схемы, наиболее полно соответствующей основным природным особенностям изучаемого склона; объективного выбора расчетных показателей, характеризующих сопротивление пород сдвигающим усилиям в состоянии наименьшей прочности; правильного выбора метода расчета. Расчетные методы для оценки устойчивости склонов подробно излагаются в курсах механики грунтов.

§ 56. Явления, связанные с промерзанием и оттаиванием пород

Замерзание и оттаивание горных пород влечет за собой ряд физико-геологических явлений, способных влиять на различные сооружения, что необходимо учитывать при строительстве. Особенно заметное влияние на сооружения оказывают процессы замерзания и оттаивания в районах распространения многолетнемерзлых пород.

Вне области распространения многолетнемерзлых пород замерзающий в зимнее время слой грунта принято называть сезонной мерзлотой или правильнее *сезонно-промерзающим слоем*. В СССР сезонное промерзание не возникает лишь в некоторых местах на черноморском и каспийском побережьях. Глубина слоя сезонного промерзания грунтов и продолжительность его сохранения зависят от температуры в зимний период и ее продолжительности, от состава грунтов, их влажности, характера растительности, времени образования снежного покрова и его мощности и т. п. Сезонное промерзание и оттаивание грунтов оказывает очень вредное влияние на части инженерных сооружений, находящихся в слое сезонной мерзлоты (фундаменты, водопроводы и т. п.). Поэтому, чтобы предотвратить отрицательное воздействие сезонного промерзания на различные объекты, их возводят ниже слоя сезонного промерзания. Глубина сезонного промерзания определяется либо путем непосредственных замеров или по схематической карте глубин сезонного промерзания грунтов, приложенной к СНиП II-А, 6-62 «Строительная климатология и геофизика», либо по формулам.

В области распространения многолетнемерзлых пород наблюдаются следующие физико-геологические процессы: морозное пучение, наледи, термокарст и солифлюкция. Наледи, термокарст и солифлюкция описаны в главе XI.

Пучение — процесс увеличения объема промерзающего грунта, происходящий как вследствие увеличения объема замерзающей влаги, так и (главным образом) в результате образования в промерзающих грунтах прослойков и линз льда, что особенно интенсивно идет в условиях миграционного подтока воды извне к фронту промерзания. Особенно мощные прослойки и линзы льда в промерзающих грунтах образуются при длительной задержке границы промерзания на некоторой глубине и близком положении к этой границе зеркала грунтовых вод. Если же промерзание идет интенсивно (при сильных морозах), то вода в дисперсных грунтах не успевает подтягиваться к фронту промерзания и линзы и прослойки льда при этом не образуются, а возникают лишь отдельные кристаллы льда, рассеянные во всей массе и прочно цементирующие его частицы.

Пучение мерзлых грунтов оказывает отрицательное воздействие на различные сооружения, но наибольшие осложнения приносит полотну автомобильных и железных дорог, а также аэродромным покрытиям. Обычно пучение грунта происходит неравномерно, что

изменяет профиль дорожного пути или покрытия и вносит значительные осложнения в работу транспорта. Весной при оттаивании грунт пучинистых мест разжижается и теряет способность поддерживать одежду дорог.

Пучение на дорогах и аэродромах имеет место не только в области распространения многолетнемерзлых пород, но и в районах сезонного промерзания грунтов, хотя проявляется здесь менее интенсивно, но тем не менее вносит значительные осложнения в нормальную эксплуатацию дорог.

Условия строительства в районах многолетнемерзлых грунтов. В связи с осуществлением широкой программы строительства разнообразных сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов огромное значение приобретают вопросы учета своеобразных климатических, гидрогеологических и грунтовых условий конкретных стройплощадок, где намечается строительство определенных объектов. Практика строительства в этих районах свидетельствует, что в результате строительства температурный режим на строительных площадках нарушается, а это самым существенным образом изменяет гидрогеологические условия и физико-механические свойства грунтов основания. Обычно мерзлые грунты оснований под влиянием теплоотдачи от сооружений оттаивают нередко на значительную глубину, а оттаявшие грунты становятся просадочными. В зависимости от скорости процесса оттаивания сооружения претерпевают деформации, нередко значительные. Следовательно, конструктивные решения при проектировании и строительстве сооружений, выполненные без учета их деформационно-напряженного состояния и условий их совместной работы с оттаивающими просадочными грунтами, приводят к преждевременному разрушению капитальных зданий, строящихся на данных грунтах. Об этом свидетельствует многолетняя практика строительства в районах Воркуты, Норильска, Забайкалья, Якутска, Магадана и др.

В СНиП II-Б,6-66 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах. Нормы проектирования» предусматривается два принципа использования мерзлых грунтов как оснований сооружений: 1) с сохранением мерзлого состояния грунтов как основания в течение всего периода эксплуатации сооружений и 2) с допущением оттаивания мерзлых грунтов основания до начала строительства или во время строительства и эксплуатации сооружения. Выбор того или иного принципа осуществляется на основе технико-экономических расчетов в зависимости от мерзлотногрунтовых и климатических условий конкретной стройплощадки, ее геоморфологических особенностей, характера застройки, температурного режима сооружений, теплотехнических характеристик приземных ограждающих конструкций и чувствительности сооружений к неравномерным осадкам.

Подробно методы инженерно-геологических исследований, проектирования сооружений на многолетнемерзлых грунтах, их

строительства и эксплуатации изложены в указанном СНиПе, а также в многочисленных специальных руководствах [29, 44 и др.].

§ 57. Инженерно-геологическая оценка явлений карста

На территории СССР карстовые явления развиты во многих районах. В связи с широким развитием карста, а также с тем, что многие месторождения полезных ископаемых (бокситы, огнеупорные глины, железные руды, уголь, редкие металлы и др.) связаны с карстом, последнему уделяется все больше внимания. Особенно большое значение имеют карстовые явления в горной промышленности в связи с тем, что при ведении горных выработок в закарстованных породах притоки воды иногда значительно возрастают. Проходка стволов шахт в карстующихся породах невозможна без применения так называемых «специальных способов» (замораживания, цементации, глинизации, битумизации, кессонного способа, предварительного понижения уровня).

Особенное значение имеет карст при строительстве гидротехнических сооружений (плотин, каналов), создании водохранилищ и т. п. Наличие карста в районе строительства гидротехнических сооружений обычно требует применения очень сложных и дорогих технических мероприятий, устраняющих отрицательное влияние карста на эти сооружения.

Большое значение имеет проблема карста и для железнодорожного транспорта, особенно при изысканиях и строительстве новых линий. Существенное влияние оказывает карст также на условия промышленного и гражданского строительства в районах его распространения. Оно выражается не только в трудностях выбора площадок для нового строительства, но и в нарушении устойчивости уже существующих сооружений.

Из всего сказанного следует, что при строительстве сооружений в районах распространения карста необходимы очень тщательные инженерно-геологические исследования, данные которых служат основой для разработки противодеформационных мероприятий. При инженерно-геологических исследованиях изучаются распространение, положение и размеры карстовых полостей, динамика карстовых вод в естественных условиях и при осуществлении строительства, связь карстовых вод с поверхностными, прочность и устойчивость закарстованных пород. Методика инженерно-геологических исследований в карстовых районах изложена в специальной литературе.

§ 58. Суффозионные процессы

С у ф ф о з и я — вынос из пород движущейся подземной водой мелких частиц, а также растворение и выщелачивание легкорастворимых веществ в породах, что приводит к деформации вышележащих масс пород.

Наиболее часто процессы суффозии проявляются в мелкозернистых песках. В результате выноса фильтрующейся водой мелких частиц пески разрыхляются, что нередко является причиной развития оползней. Этот вид суффозии получил наименование механической. Механическая суффозия может проявиться только при соответствующем гранулометрическом составе и структуре песков и наличии так называемого гидродинамического давления на склоне. Гидродинамическое давление фильтрующейся подземной воды играет значительную роль в деформации искусственных откосов и естественных склонов.

§ 59. Плывуны

В практике под плывунами понимают водонасыщенные породы, которые при вскрытии их в котлованах, горных выработках, выемках и т. п. ведут себя подобно тяжелым, вязким жидкостям, приходя в движение и оплывая. В плывунном состоянии могут находиться породы самого различного гранулометрического состава, способные при наличии соответствующего гидравлического градиента либо при встряхивании, вибрировании и других внешних механических воздействиях оплывать при вскрытии.

В подавляющем большинстве случаев плывунные свойства присущи мелко- и тонкозернистым пескам, в которых содержатся некоторое количество глинистых фракций и органические коллоиды. В породах глинистого и суглинистого состава плывучесть, а точнее текучесть проявляется только в свежеотложившихся осадках, когда они имеют очень рыхлое сложение, примером чего являются илы. Крупнозернистые породы — пески, галечники, иногда даже гравий — в плывунное состояние переходят только при наличии значительной разности уровней подземных вод в котловане или горной выработке и за их стенками, когда проявляется взвешивающее действие гидродинамического давления.

У одних пород плывунные свойства весьма стойкие, у других же при осуществлении некоторых мероприятий по их осушению они не проявляются. А. Ф. Лебедев на основе наблюдений в натуре и проведенных опытов установил, что в природе существуют два типа плывунов: ложные, или псевдоплывуны, и истинные. В псевдоплывунах основной причиной, обусловливающей проявление в них плывучести, является соответствующее гидродинамическое давление. Природа плывучести истинных плывунов сложна. К наиболее активным плывунам относятся тонкозернистые пески, содержащие до 8—13% глинистой фракции монтмориллонитового состава и органические коллоиды.

Способы борьбы с плывунами разнообразны и многочисленны. Для борьбы с ложными плывунами наиболее эффективной мерой является их осушение. Способы осушения различны, методы расчета дренажных установок зачастую весьма сложны и излагаются в специальных руководствах.

Борьба с истинными плывунами часто требует применения сложных и дорогостоящих мероприятий. Основными из них являются: устройство шунтовых перемычек, ограждающих котлован, траншею и другие объекты от плывуна; замораживание плывунов, что придает им временную прочность; применение сжатого воздуха (кессонный способ); электродренаж и электроуплотнение плывунных пород; осушение иглофильтрами в комбинации с вакуумированием или с электродренажем; химические способы закрепления плывунов (силикатизация, смолизация и др.). Выбор того или иного способа осуществляется по результатам технико-экономических расчетов.

§ 60. Землетрясения

Сейсмические явления различным образом влияют на устойчивость сооружений, что в основном зависит от следующих факторов: состава и свойств пород, служащих основанием сооружений; гидрогеологических особенностей местности; наличия и характера физико-геологических явлений; тектонических условий; силы землетрясений; характера и конструктивных особенностей сооружения.

В СССР принята 12-бальная шкала для определения силы землетрясений. Землетрясения с силой до 6 баллов существенного значения для строительства не имеют. В связи с этим в СССР утвержден ГОСТ 6249—59 «Шкала для определения силы землетрясения в пределах от 6 до 9 баллов», так как в нашей стране землетрясения с силой свыше 10 баллов не проявляются.

Каждому баллу по 12-балльной шкале соответствует определенная величина сейсмического ускорения α, вычисляемая по формуле

$$\alpha = A\frac{4\pi}{T^2}, \tag{61}$$

где A — амплитуда колебаний;

T — период колебаний сейсмической волны.

По величине α определяется коэффициент сотрясения, или сейсмичности

$$K_c = \frac{\alpha}{g}, \tag{62}$$

где g — ускорение силы тяжести.

Коэффициент сейсмичности используется при расчете сооружений на антисейсмичность, что подробно излагается в СНиП II-А,12-62. При землетрясениях свыше 6 баллов СНиП II-А,12-62 предусматривает различные антисейсмические мероприятия, которые способствуют сохранению сооружений от катастрофических разрушений.

§ 61. Инженерно-геологические явления

Инженерная деятельность человека вносит существенные изменения в ход физико-геологических процессов и явлений, которые тесно взаимодействуют с построенными сооружениями, оказывая на них

определенное влияние, чаще всего отрицательное. Явления и процессы, обусловленные совместным взаимодействием геологической среды с инженерными сооружениями, по предложению Г. Н. Каменского, называются *инженерно-геологическими*.

Инженерно-геологические процессы и явления могут быть самыми разнообразными, что обусловливается разносторонней инженерной деятельностью человека, с одной стороны, и чрезвычайным разнообразием природных условий, в которых она осуществляется, — с другой. Наиболее существенное значение имеют следующие инженерно-геологические процессы: деформации грунтов в основании сооружений; просадки в лёссовых грунтах; деформации грунтов при вскрытии котлованов; переработка берегов водохранилищ; горное давление и пучение в горных выработках и туннелях; сдвижение горных пород над подземными выработками.

Деформации грунтов в основании сооружений. Различные сооружения оказывают на горные породы, являющиеся основанием сооружений, дополнительное давление от долей до 3—5 $кГ/см^2$, а в отдельных случаях (высотные здания, опоры мостов, гравитационные плотины и др.) до 15—25 $кГ/см^2$ и более. Дополнительное давление от веса сооружений действует на грунты основания как постоянная статическая вертикальная нагрузка, под влиянием которой толща пород сжимается, что приводит к оседанию поверхности земли и построенных на ней сооружений. Вертикальные перемещения сооружений, обусловленные сжатием грунтов основания, называются *осадками*. Абсолютная величина осадок зависит от свойств грунтов и колеблется от долей сантиметра до 1 *м* и более. Не всякая осадка опасна для сооружений. Равномерная осадка в пределах всего периметра сооружения не опасна, если даже она будет достигать десятков сантиметров. Опасны неравномерные осадки сооружений, что обычно и наблюдается.

Величина осадок сооружений зависит от следующих факторов: физико-механических свойств грунтов, величины внешнего давления (веса сооружений на единицу площади основания), размеров фундаментов в плане, их формы. В настоящее время исходят из представления о совместной работе сооружения с грунтами основания, которые в совокупности представляют единую динамическую систему. Когда сооружение гибкое, оно приспосабливается к деформациям основания и никаких вредных напряжений в его элементах не возникает, если деформации грунтов основания не превышают предельных значений. Жесткие сооружения ни при каких условиях не искривляются и поэтому они сами выравнивают деформации сооружения, приводя их к общей средней осадке (разумеется, при условии, если деформации грунтов основания не превышают предельно допустимых). Сооружения не вполне гибкие и не вполне жесткие воспринимают деформации основания лишь частично и лишь частично их выравнивают. Следовательно, в элементах таких сооружений

возникают дополнительные напряжения, определить которые можно только при совместном рассмотрении общих деформаций (грунтов и сооружений). В грунтах под влиянием внешних нагрузок возникают внутренние деформации, которые зависят от характера грунта и подразделяются на упругие и остаточные.

Сжимаемость пород разного состава и сложения различна. Скальные породы в пределах практически достигаемых нагрузок испытывают только упругие деформации и деформации, связанные с закрытием трещин; абсолютные величины этих деформаций особого значения не имеют. Только при строительстве высоких арочных плотин, имеющих в плане значительные размеры, возникает необходимость учета этих деформаций с целью осуществления нужных профилактических мероприятий, предотвращающих развитие в сооружениях недопустимых деформаций.

Сжимаемость гравия, галечника и других подобных грунтов, обусловливаемая взаимным перемещением частиц, в пределах практически достигаемых нагрузок незначительна и не имеет существенного значения.

Сжимаемость песков может быть самой различной в зависимости от степени плотности песков, их состава, сложения, увлажнения и характера нагрузки. При действии только статических нагрузок даже рыхлосложенные пески будут уплотняться в пределах, не опасных для сооружений. Несколько повышенная сжимаемость наблюдается в слабоуплотненных тонкозернистых и пылеватых разностях песчаных грунтов. При действии же динамических нагрузок уплотнение всех разновидностей песков, особенно рыхлосложенных, может быть весьма значительным и тем большим, чем выше интенсивность сотрясений. Особенно чувствительны к динамическим сотрясениям рыхлые мелкозернистые водонасыщенные пески. Это обусловливается тем, что при уплотнении в них возникают восходящие токи воды, взвешивающие минеральные частицы. При этом резко снижается внутреннее трение между песчинками, пески вначале разжижаются, а затем уплотняются. Сооружения, в основании которых залегают пески, перешедшие под влиянием динамических нагрузок в разжиженное состояние, претерпевают значительные деформации, вплоть до катастрофических. Признаками, указывающими на потенциальную возможность разжижения песков при динамических нагрузках, по С. А. Рова, являются: мелкозернистый состав, однородность гранулометрического состава, рыхлое сложение (объемный вес скелета менее 1,55 $т/м^3$), водонасыщенное состояние, малая пригрузка.

Наибольшая сжимаемость присуща грунтам глинистого состава. Особенно большие осадки (десятки сантиметров и нередко более 1 *м*) испытывают высокие земляные плотины, имеющие большую площадь основания, а также портовые сооружения (молы, набережные, причальные стенки и др.), которые часто приходится возводить на слабых водонасыщенных грунтах. Осадки сооружений, построенных на подобных грунтах, часто сопровождаются выпором грунтов

из-под подошвы фундаментов, что приводит к значительным деформациям сооружений и даже к их разрушению. Большое значение имеет развитие во времени осадок сооружений, воздвинутых на глинистых грунтах, которые могут протекать в течение ряда лет и даже десятилетий. Процесс сжатия грунтов во времени называется к о и с о л и д а ц и е й.

Как уже указывалось, для сооружений, возводимых на любых грунтах, опасны не абсолютные величины осадок, а их неравномерность. Особенно значительные неравномерные осадки наблюдаются в сооружениях, в основании которых залегают грунты со сложной текстурой — косослоистые, линзовидные, при наличии сильно сжимаемых прослоев различной мощности, валунов разных размеров и т. п. В связи с неравномерностью осадок сооружений в Советском Союзе правилами проектирования в качестве обязательного принят расчет основания по предельной деформации, под которой понимается такая деформация грунтов основания, превышение которой приводит надфундаментную часть сооружения в состояние, не удовлетворяющее требованиям эксплуатации.

П р о с а д к и в л ё с с о в и д н ы х г р у н т а х. Лёсс — однородная тонкозернистая, обычно неслоистая рыхлая горная порода. Лёссовидные грунты обладают одним общим свойством — недоуплотненной структурой, не отвечающей напряженному состоянию, в котором эти грунты находятся в условиях естественного залегания. Недоуплотненность обусловливает значительную пористость этих пород, достигающую иногда более 50%. Помимо обычной пористости лёссовидным грунтам и лёссам присуще также наличие крупных пор — м а к р о п о р (иногда более 1 *мм*), хорошо видимых невооруженным глазом, преимущественно в виде вертикальных трубочек. Состоят лёссы и лёссовидные грунты преимущественно из фракций пыли и имеют характерную палево-желтую или желто-бурую окраску. Распространены эти породы очень широко. В пределах СССР они залегают на бо́льшей части площади УССР, на юго-востоке Европейской части страны, в Закавказье, Средней Азии, Сибири и на Дальнем Востоке; на относительно небольших площадях встречаются также в Белоруссии, в Центральных областях и других местах. Схематическая карта распространения лёссовых грунтов на территории СССР приведена в СНиП II-А.6-62 «Строительная климатология и геофизика. Основные положения проектирования». Залегают лёссы и лёссовидные грунты на водоразделах в виде покрова, плащеобразно перекрывая более древние образования. Мощность их достигает иногда многих десятков метров, а в основном составляет 15—20 *м*. Ввиду значительной распространенности лёссы и лёссовидные грунты во многих случаях служат основанием самых различных сооружений или средой, в которой осуществляется строительство дорожных выемок, каналов и других объектов.

В естественных условиях при малой влажности лёсс и лёссовидные грунты обладают значительной механической прочностью и устойчивостью в откосах, сохраняя почти вертикальное положение

при высоте откоса иногда более 10 *м*. При увлажнении же их прочность существенно уменьшается и они доуплотняются. Это свойство грунтов называется просадочностью и сопровождается необратимым изменением их структуры.

Просадки лёссовых пород в основании сооружений обычно неравномерные, что обусловливает неравномерную осадку сооружений, величина которой колеблется от нескольких десятков сантиметров до 1,5—2 *м* и более. Неравномерность осадок сооружений приводит к образованию в зданиях трещин и других деформаций, а нередко и к их разрушению. Следовательно, чтобы предохранить сооружения, возводимые на просадочных грунтах, от различных деформаций, необходимо заранее знать степень их просадочности, в соответствии с чем и осуществляются различные защитные мероприятия, обеспечивающие устойчивость сооружений на весь срок их эксплуатации.

При определении степени просадочности лёссовых грунтов необходимо учитывать их генезис и стратиграфию. Из многочисленных генетических типов лёссовых грунтов (эоловых, аллювиальных и пролювиальных) наибольшая просадочность присуща эоловым и пролювиальным разностям.

В соответствии со СНиП II-Б. 2-62 грунтовые условия строительных площадок в зависимости от возможности проявления просадки от его собственного веса при замачивании подразделяются на два типа:

I тип — просадка грунта практически отсутствует или не превышает 5 *см*;

II тип — просадка возможна и величина ее превышает 5 *см*.

Установленный тип грунтовых условий по просадочности используется для назначения мероприятий, осуществление которых обеспечивает устойчивость и эксплуатационную пригодность сооружений. Разделение лёссовых грунтов на просадочные и непросадочные производится путем послойного определения показателя относительной просадочности исследуемой толщи лёссовых грунтов. В соответствии с указанными нормами и правилами количественно степень просадочности лёссовых грунтов определяется в лабораторных условиях и непосредственно в поле. Методика этих определений изложена в соответствующей литературе [6, 20, 33, 48, 53]; там же указываются и соответствующие противодеформационные мероприятия.

Деформации откосов карьеров и выпирание дна котлованов. При вскрытии котлованов, глубоких дорожных выемок, траншей, каналов, строительстве карьеров для разработки полезных ископаемых возможны самые разнообразные инженерно-геологические процессы и явления, которые необходимо заранее предвидеть и своевременно принимать нужные профилактические меры, устраняющие отрицательное воздействие этих процессов и явлений на условия строительства сооружений и дальнейшую эксплуатацию последних. Чаще всего в котлованах, траншеях,

карьерах и других подобных выработках проявляются следующие инженерно-геологические процессы и явления: нарушение устойчивости откосов; набухание, пучение и выпирание грунтов на дне выработок; прорыв плывунов. Нарушения устойчивости откосов чаще всего проявляются в следующих формах: оползании, обвалах, выдавливании, размыве откоса.

Если в откосе будет наблюдаться выход подземных вод, то деформации откоса могут быть обусловлены проявлением процессов суффозии и гидродинамического давления, а также тем, что вода утяжеляет породы в откосе, уменьшает в них силы трения и сцепления, действует как смазка в контактных поверхностях пород. В этом случае осушение пород является основным мероприятием, предотвращающим деформации откосов.

Выдавливание откоса или его части обусловливается проявлением свойств ползучести в глинистых породах, слагающих откосы, под давлением вышележащих масс горных пород. В результате выдавливания откосы оседают и смещаются. Подобные деформации наблюдаются в длительно существующих выемках и карьерах, когда под влиянием значительного перепада давления (на откосах давление равно нулю, а на некотором удалении от него в глубь откоса оно соответствует глубине, умноженной на объемный вес вышележащих пород) в глинистых породах проявляются процессы расслабления напряжений (релаксация), что и приводит по истечении какого-то времени к их выдавливанию. Для предотвращения подобной деформации откосы постоянно существующих выемок и карьеров должны уполаживаться до нужной крутизны, что снижает перепад давления до безопасной величины, или же в основании откоса, сложенного глинистыми породами, устраивают искусственно подсыпку, что также снижает перепад давления.

Размыв откосов может быть обусловлен неорганизованным отводом ливневых и талых вод, в результате чего на откосах образуются промоины различной ширины и глубины и, как правило, с очень крутыми стенками, что и приводит затем к деформации стенок промоин, в свою очередь способствующей деформации откосов. Мерами борьбы с размывом откосов является отвод осадков нагорными канавами.

Пучение, выпирание дна котлована и прорыв подземных вод в котлован. Подобные явления возможны в том случае, если в котлованах вскрываются глинистые водоупорные породы, перекрывающие нижележащий водоносный горизонт с напорной водой. В зависимости от величины гидростатического давления, испытываемого глинистыми породами на дне котлована, возможно горбообразное вздутие дна траншеи, выемки или котлована — пучение (не надо смешивать этот вид пучения с мерзлым, разобранным выше) или даже выпор дна с прорывом подземных вод в котлован. Следовательно, основной причиной подобных процессов является наличие соответствующих гидрогеологических условий.

Количественно возможность пучения и выпора дна котлована при незначительной его ширине (несколько метров) и значительной протяженности определяется различными методами (В. Д. Слесарева, К. Кегеля и др.). В последние годы Ленинградским горным институтом (Н. Г. Паукер) предложена следующая формула для определения допустимого гидростатического напора $H_н$, предотвращающего выпор и прорыв подземных вод из подошвы котлована:

$$H_н = \frac{2\sigma h}{\eta \gamma_в l_э} + \frac{\gamma_0}{\gamma_в} \cdot h, \qquad (63)$$

где σ — временное сопротивление глинистых пород на прорыв их водой в $т/м^2$, определяемое в специальном приборе;

h — расчетная мощность водоупора, $м$;

$\gamma_в$ — объемный вес воды, $т/м^3$;

γ_0 — объемный вес водоупорной породы, $т/м^3$;

$l_э$ — эквивалентная ширина траншеи, выемки или котлована, определяемая по выражению

$$l_э = \frac{a \cdot l}{a + l},$$

где a — протяжение котлована, $м$;

l — ширина котлована, $м$;

η — коэффициент запаса, принимаемый равным 3—4.

При значительной ширине котлована возможность прорыва напорных вод в него определяется по формуле

$$H_0 \gamma_в \leqslant \gamma_0 h, \qquad (64)$$

где H_0 — гидростатическое давление на подошву водоупора в естественных условиях, $м$.

Основным мероприятием, устраняющим пучение и выпор дна котлована и прорыв воды в него, является снижение напора в напорном водоносном горизонте до безопасных величин, что устанавливается соответствующими гидрогеологическими расчетами, методика которых излагается в специальных руководствах.

Переработка берегов водохранилищ. В СССР осуществляется широкое строительство плотин и создание водохранилищ, вода из которых используется на самые различные нужды (для выработки электроэнергии, орошения, регулирования судоходства и т. п.). На водохранилищах, особенно крупных, под влиянием волн наблюдаются процессы переработки берегов и образование склонов нового профиля, что вызывает разрушение самых различных сооружений, располагающихся в зоне переработки.

Существует множество способов определения конечной величины зоны переработки и расчета скорости переработки во времени [20].

Горное давление. Под горным давлением понимаются напряжения в горных породах, возникающие в них при проходке выработок. В естественных условиях горные породы находятся в состоянии напряженного равновесия. После проходки выработки

равновесие нарушается, вокруг нее в породах возникают напряжения сжатия, растяжения и сдвига, которые часто превосходят предел прочности пород, следствием чего является их деформация. Для предотвращения последней в выработках устанавливается крепление. Породы, стремящиеся к обрушению, будут оказывать на крепь механическое воздействие, которое и называется горным давлением.

Основной причиной, вызывающей горное давление, является сила тяжести — вес горных пород. Но конкретные формы проявления горного давления в подземных выработках зависят от сочетания многих факторов в их взаимодействии: физико-механических свойств пород, их тектонической нарушенности характера слоистости и других свойств; глубины выработок, их размеров, формы и взаимного расположения; ориентировки выработок по отношению к элементам залегания горных пород; скорости проходки выработок и скорости постановки крепления; способа крепления кровли и механических свойств материалов, применяемых для крепления выработок.

Из многочисленных гипотез, объясняющих проявление горного давления, широко распространена гипотеза свода обрушения, наиболее обоснованно изложенная М. М. Протодьяконовым в 1907 г. и используемая до сих пор. Согласно этой гипотезе величина горного давления определяется весом горных пород в объеме свода обрушения, образующегося в кровле выработки и имеющего сверху вид параболы. Высота свода обрушения, по М. М. Протодьяконову, вычисляется по формуле

$$y = \frac{a}{f}, \tag{65}$$

где y — высота свода обрушения;

a — полуширина выработки;

f — коэффициент крепости пород (по М. М. Протодьяконову).

Величина горного давления, обусловленная весом породы в объеме свода обрушения, определяется по формуле

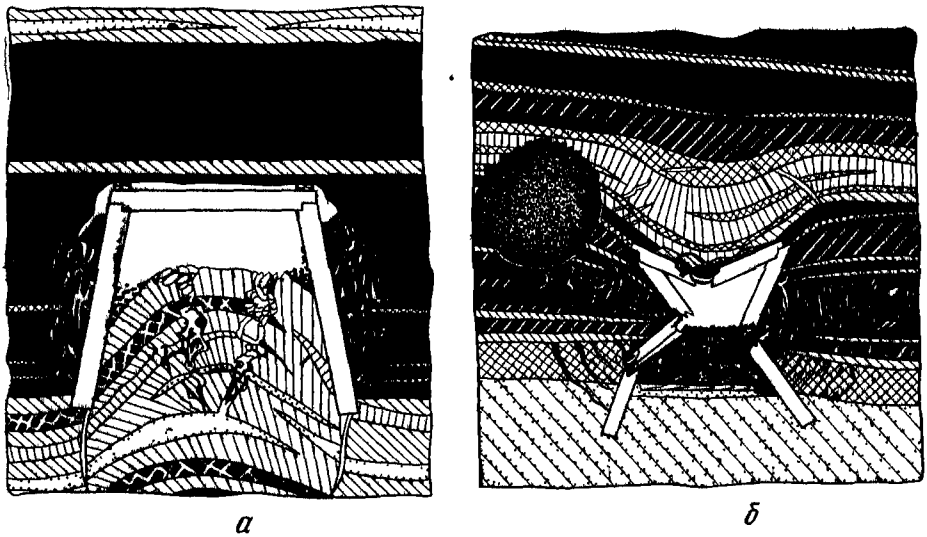
$$P = 4/3\gamma_0 \; a \cdot y \; кГ/см^2, \tag{66}$$

где γ_0 — объемный вес пород в пределах свода обрушения.

Величины коэффициента крепости различных пород приведены в справочных изданиях по горному делу. Приближенно он равен 1/100 предела прочности породы на раздавливание, что не совсем точно определяет этот показатель, так как в природных условиях массиву пород присуща различная степень выветрелости, трещиноватость, слоистость и другие ослабленные зоны, что снижает прочность пород в массиве по сравнению с прочностью отдельно испытуемого образца. Соответственно величине горного давления и проводится расчет крепления выработки. Расчет крепления по величине горного давления, определяемого по существующим методам, является ориентировочным; окончательно тип и материал для крепления выбирается после натурного определения величины горного давления (с по-

мощью различных приборов) непосредственно в выработках. Величина давления, передаваемая на крепление в туннелях по данным наблюдений, изменяется в пределах от 0 до 50 $т/м^2$ во время производства работ, увеличиваясь в последующем до 120 $т/м^2$ и более.

Пучение в горных выработках. Пучением называют деформации горных пород в виде пластического выдавливания их в выработки (рис. 63). Пучение является разновидностью горного давления. На глубине нескольких сотен метров оно возникает преимущественно в глинистых породах определенного минерального состава.



а *б*

Рис 63 Пучение в шахте (по А И. Целигорову)
а — пучение в почве, *б* — пучение в кровле выработки с разрушением крепления

При прочих равных условиях наиболее интенсивно пучение проявляется в глинистых породах монтмориллонитового состава, обогащенных гумусом, и при наличии в диффузном слое катионов щелочной группы, когда скорость пучения достигает 20—25 *см* г сутки.

О возможности проявления пучения в горных выработках судят по следующим данным: наличию глинистых пород в почве выработок, их мощности, текстурным особенностям, тектонической нарушенности, микротрещиноватости, минеральному составу и коллоидно-химическим свойствам, обогащенности глинистых пород гумусовым веществом.

Поскольку пучение в горных выработках является процессом реологического характера, то проявляется оно не сразу после проходки выработки, а с течением времени. С учетом этого его отрицательное воздействие может быть устранено или значительно снижено быстрыми темпами проходки выработок и немедленным их креплением. Все пустоты между облицовкой и породой должны тщательно

тампонироваться сразу же после установления крепи (облицовки). При надлежащем типе крепи эти мероприятия предотвращают развитие в глинистых породах процессов расслабления напряжений (релаксации), тем самым процесс ползучести в породах не проявится и горные выработки будут предохранены от деформаций.

Прорыв в выработки подземных вод и газов. Подобные прорывы возможны при наличии тектонических трещин, зон разлома и карстовых пустот. Прорывы проявляются только у забоя подземных выработок. Для предотвращения прорывов при подходе подземных выработок к участку, где возможен прорыв, из забоя проходят опережающие скважины в горизонтальном или наклонном положении, нередко веерообразно. Количество

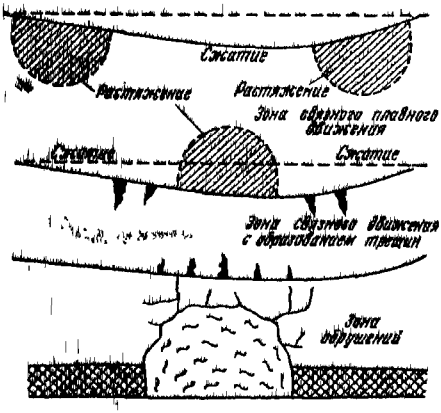


Рис. 64. Зоны сдвижения пород над выработанным пространством (по С. Г. Авершину)

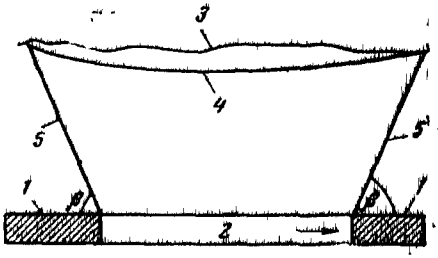


Рис. 65. Схема образования мульды сдвижения

1 — пласт полезного ископаемого; *2* — выработанное пространство; *3* — первоначальное положение поверхности земли; *4* — поверхность земли в пределах мульды сдвижения; *5* и *5'* — границы зоны сдвижения; *β* — угол сдвижения

скважин, их глубина, конструкция определяются гидрогеологическими расчетами, методика которых описывается в специальных руководствах. Проходка опережающих скважин осуществляется с принятием необходимых мер предосторожности.

При наличии по трассе подземной выработки на какой-либо глубине ниже подошвы выработки водоносного горизонта с напорной водой и при недостаточной мощности водоупорного пласта возможны прорывы подземных вод со стороны почвы. Возможность подобных прорывов определяется по формулам (63) и (64). Для предотвращения подобных прорывов в почву выработок сразу же после их проходки устанавливаются трубчатые водопонижающие колодцы, устройство которых осуществляется с принятием нужных мер безопасности.

Сдвижение горных пород — это деформации в породах, залегающих над выработанным пространством. После выемки полезного ископаемого непосредственно над выработанным пространством на высоту $h = (3—10)\ m$, где m — мощность пласта полезного ископаемого, породы полностью разрушаются и обрушаются в выработанное пространство (если только последнее не будет искус-

ственно заполнено каким-либо материалом). Выше возникает комбинированный вид сдвижения: частичное обрушение и главным образом прогиб пластов и еще выше — чистый прогиб пластов (рис. 64).

В результате сдвижения горных пород поверхность земли над выработанным пространством оседает, что приводит к образованию так называемой мульды сдвижения (рис. 65). В пределах мульды сдвижения возникает опасность разрушения поверхностных сооружений (зданий, дорог, плотин, мостов и др.). Оконтуривают мульды сдвижения графическим построением, в основу чего кладутся так называемые углы сдвижения. Сдвижение горных пород определяется специальными расчетами, методика которых изложена в соответствующих руководствах.

В соответствии с установленной степенью опасности, а также в зависимости от категории сооружения применяются различные мероприятия, предохраняющие сооружения от недопустимых деформаций.

ГЛАВА XVI

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

§ 62. Задачи и виды исследований

Гидрогеологические условия имеют значительное, нередко решающее значение при оценке разведанных месторождений. Поэтому при разведке различных месторождений полезных ископаемых изучению их гидрогеологических и инженерно-геологических особенностей всегда уделяется должное внимание. Проводятся они одновременно с геологоразведочными работами. В соответствии с «Требованиями к содержанию и результатам геологоразведочных работ по этапам и стадиям. Твердые полезные ископаемые» (1967) разведка месторождений полезных ископаемых проводится в три этапа: региональная геологическая съемка; поиски месторождений полезных ископаемых; разведка месторождений полезных ископаемых. В зависимости от этапа разведки, а также типа месторождения и сложности геологического строения района исследований и гидрогеологических условий объем, содержание, методика и техника гидрогеологических исследований могут существенно изменяться. При этом месторождения различных типов (см. главу XX) в зависимости от сложности геологического строения и гидрогеологических условий в свою очередь подразделяются на подтипы, соответственно чему дифференцируются общий объем гидрогеологических исследований и методика их выполнения.

На первом этапе проводится комплексная геолого-гидрогеологическая маршрутная или площадная съемка в масштабах 1 : 25 000—1 : 100 000 и мельче, которой предшествует сбор и изучение всех фондовых и опубликованных материалов по району предстоящих работ. В процессе ведения съемки осуществляется наблюдение за источниками, колодцами, собираются материалы по действующим и недействующим буровым скважинам, если в районе работ или поблизости имеются эксплуатируемые или уже выработанные месторождения, собираются данные наблюдений за притоками воды в горные выработки. Полученные материалы дают возможность получить самое общее представление о гидрогеологических условиях месторождения.

На втором этапе разведки комплексная геолого-гидрогеологическая съемка проводится в более крупном масштабе (1 : 25 000 и крупнее), бурятся одиночные гидрогеологические скважины для производства опытных работ, устанавливаются количество водоносных горизонтов, их состав, мощность, глубина залегания, величина напоров, определяется гидравлическая взаимосвязь водоносных горизонтов между собой и с водами поверхностных водотоков и водоемов; наиболее полно освещается основной водоносный горизонт, который в наибольшей степени будет обводнять горные выработки. Количество одиночных гидрогеологических скважин зависит от площади разведуемого месторождения и сложности геолого-гидрогеологических условий и определяется в каждом конкретном случае особо. Полученные в процессе ведения разведки на втором этапе материалы дают возможность выявить перспективные месторождения, охарактеризовать степень обводненности месторождения в целом и отдельных его участков, а также обоснованно запроектировать виды и объем опытных гидрогеологических работ на следующей стадии разведки и служат основой проектирования горного предприятия на стадии ТЭД.

На третьем этапе разведки основным назначением гидрогеологических исследований является получение необходимых данных для утверждения запасов полезного ископаемого по категориям А и В и составления комплексного проектного задания по освоению месторождения, в том числе по вопросам осушения и водоснабжения. В период проведения геологоразведочных работ на этом этапе разведки должны быть: детально изучены условия обводнения горных выработок; выявлены количественно статические и динамические запасы подземных вод в пределах всего месторождения и отдельно для каждого шахтного поля; в соответствии с ожидаемыми притоками и характером обводненности горных выработок обоснованы мероприятия по борьбе с подземными водами при вскрытии месторождения и затем при ведении эксплуатационных работ; изучены физико-механические свойства пород для расчетов ожидаемого горного давления и пучения, а в случае ведения работ открытым способом — для расчета устойчивости откосов; качественно и количественно изучены источники водоснабжения, с рекомендацией наиболее

благоприятных участков для устройства водозаборных сооружений нужного типа.

По материалам разведки на третьем этапе составляются геолого-гидрогеологические карты масштаба 1 : 25 000—1 : 5000, а для отдельных наиболее сложных участков и в более крупном, которые и позволяют обоснованно решать все вопросы, возникающие при составлении комплексного проекта вскрытия и разработки месторождения.

§ 63. Гидрогеологическая съемка

Гидрогеологическая съемка предназначена для изучения гидрогеологических условий картируемой территории. В ее задачи входят: выяснение наличия, распространения, состава и мощности водовмещающих и водоупорных пород; изучение условий питания, движения и разгрузки подземных вод, фильтрационных свойств водоносных пород; выяснение качества, ресурсов и режима подземных вод; изучение разнообразных геологических, геоморфологических, гидрологических, климатических, геокриологических и других факторов формирования подземных вод.

В соответствии с инструктивными указаниями [27, 28] в процессе гидрогеологической съемки должен быть собран фактический материал, достаточный для характеристики гидрогеологических условий картируемой территории, соответствующий целям и масштабу исследований.

Основным видом работ, применяемым при гидрогеологической съемке, являются маршрутные исследования. При проведении гидрогеологических маршрутов подробно описываются естественные выходы подземных вод (источники, заболоченность, мочажины, более пышная и яркая растительность и т. п.), шахтные колодцы, буровые скважины, кяризы и другие выработки, вскрывающие подземные воды. При изучении естественных выходов подземных вод и выработок, вскрывших подземные воды, необходимо: установить местоположение водоисточника на местности и высоту его по отношению к уровню ближайшей реки, балки, озера и т. п.; выяснить, к каким породам приурочены подземные воды, питающие данный водоисточник, отметив их возраст, условия залегания, литологический состав, характер слоистости, трещиноватости, закарстованности; описать физические свойства воды — температуру, вкус, запах, цвет, прозрачность; провести полевой химический анализ воды.

При изучении источников, помимо упомянутого, необходимо: выяснить тип родника (нисходящий или восходящий); установить характер выхода подземной воды (коренной или дериват), форму и размеры родниковой воронки; зарисовать и сфотографировать место выхода источника; изучить режим источника за период не менее года; если источник вытекает из трещин, определить характер трещины, ее размеры, падение и простирание; охарактеризовать

минеральные отложения источника и отобрать из них пробы для химического анализа; замерить расход (дебит) источника.

При описании шурфов, колодцев и скважин, помимо упомянутого, необходимо: определить их глубину от поверхности земли до дна и диаметр; определить положение уровня воды от поверхности земли; характер использования воды и наличие водоподъемных средств; определить в необходимых случаях дебит; провести полевой химический анализ воды. При наличии эксплуатационных на воду скважин необходимо по архивным данным получить геологический и технический разрез скважин, выяснить количество вскрытых ими водоносных горизонтов, их стратиграфическое положение, производительность и химический состав воды каждого горизонта.

Из характерных водопунктов отбираются пробы воды (а при необходимости и газа) для сокращенного и полного анализов. Опробованию подвергаются все водоносные горизонты на различных участках, выделяемых по геоструктурным, геоморфологическим и другим признакам. Как правило, пробы воды отбираются в областях питания, погружения и разгрузки каждого водоносного горизонта. Для сокращенного анализа проба воды отбирается объемом 1 *л*, для полного — не менее 2 *л*, а в районах, где возможно наличие руд цветных и редких металлов, нефти, газа или лечебных вод, — 3—5 *л*.

Гидрогеологическая съемка сопровождается бурением скважин, проходкой шурфов и канав; для закрытых районов и предгорий результаты бурения являются основными материалами для составления гидрогеологической карты. Расположение буровых скважин при съемке осуществляется с таким расчетом, чтобы ими были охарактеризованы все основные горизонты в различных геолого-структурных и геоморфологических элементах. Первые от поверхности водоносные горизонты должны быть охарактеризованы точками наблюдений в количестве от 0,08 до 0,36 на 1 $км^2$ в зависимости от сложности гидрогеологических условий и масштаба съемки. Для характеристики более глубоких горизонтов буровые скважины проходятся из расчета одна-две на каждый геоструктурный элемент в пределах планшета, но не менее трех на планшет. Глубина скважин определяется, как правило, глубиной залегания водоносного горизонта, имеющего практическое значение для данного района. Не исключается бурение глубоких структурно-гидрогеологических скважин, что обосновывается в проекте работ. Все горные выработки документируются в журналах, форма которых приведена в инструкциях [27, 28].

Количественное опробование водоносных горизонтов, вскрываемых скважинами, проводится прокачками (тартанием), пробными и опытными откачками. Прокачки (желонирование) производятся во всех скважинах, вскрывающих водоносные горизонты. Пробные откачки проводятся из всех водоносных горизонтов; количество пробных откачек из каждого водоносного горизонта на площади одного планшета должно быть не менее трех. Основные водоносные

горизонты или комплексы характеризуются опытными откачками при трех понижениях. Каждый основной водоносный горизонт или комплекс должен быть охарактеризован не менее чем одной опытной откачкой на планшет. Количество пробных и опытных откачек, предусмотренных проектом, в соответствии с выявленными в процессе ведения полевых работ конкретными природными условиями может быть изменено, но затем должно быть обосновано. В процессе откачек ведется журнал откачки, форма которого приведена в инструкции.

В процессе гидрогеологической съемки проводятся наблюдения за режимом подземных вод в специально оборудованных для этой цели наблюдательных точках (скважинах, шурфах, над источниками). Наблюдательные точки располагаются в наиболее характерных местах распространения водоносных горизонтов (водоразделах, речных долинах и т. п.). Наблюдения в пределах одного и того же планшета проводятся не менее года. При организации наблюдений за режимом подземных вод руководствуются специальной инструкцией и методическим руководством, составленным ВСЕГИНГЕО [26].

Полевые гидрогеологические карты составляются непосредственно в поле, с непрерывным наращиванием заснятой площади; составление полевых карт по окончании полевых работ категорически запрещается. Все описанные обнажения, геоморфологические створы, физико-геологические явления, колодцы, скважины, источники и другие точки наблюдений наносятся на карту под соответствующими номерами. Нумерация в пределах планшета должна быть единой, эти же номера должны соответствовать зарисовкам, фотографиям, коллекциям образцов и проб воды. Все гидрогеологические точки наносятся на карту условными знаками, которые ставятся также в полевой книжке рядом с номером точки наблюдения. Описание скважин, колодцев и источников проводится по формам, образцы которых приведены в инструкциях [27, 28].

Пробы воды для полевых химических анализов отбираются из всех источников, скважин, колодцев, озер, рек, прудов и других водоемов. Анализ проб на нестойкие составляющие (pH, CO_2, Fe^{2+} и H_2S) должен проводиться непосредственно у водоисточника либо в полевой лаборатории на базе партии не позднее одного дня после взятия пробы. К пробам на сокращенный и полный химические анализы, отправляемым в стационарную лабораторию, прикладываются результаты определения нестойких компонентов.

В процессе ведения гидрогеологической съемки отбираются образцы пород из обнажений, скважин и шурфов из основных рыхлых литологических и генетических разностей; для определения объемного веса образцы отбираются с ненарушенной структурой и немедленно парафинируются. На отобранных образцах определяются следующие характеристики: гранулометрический состав, удельный и объемный вес, естественная влажность, пределы пластичности, коэффициент фильтрации (в трубке «Спецгео» или Каменского) и водоотдача; этот перечень может видоизменяться, что предусматривается в проекте работ.

Аэрофотосъемка и аэровизуальные наблюдения применяются для картирования грунтовых вод и физико-геологических явлений, что позволяет значительно сократить объем других видов полевых исследований, повысить производительность работ, более точно зафиксировать очертания изучаемых объектов и их пространственные изменения. Гидрогеологическое дешифрирование аэрофотоснимков является весьма сложной задачей; методика дешифрирования излагается в специальных руководствах.

Геоботанические наблюдения позволяют получить важные сведения о подземных водах, залегающих вблизи поверхности земли, о литологическом составе и фильтрационных свойствах водоносных пород. В качестве показателей гидрогеологических условий используются растительные сообщества, а также отдельные виды растений, которые С. В. Викторов и Е. А. Востокова называют *гидроиндикаторами*. Особенно эффективны геоботанические наблюдения в засушливых и пустынных областях, а также в районах развития болот и заболоченных массивов.

§ 64. Поиски и разведка подземных вод для водоснабжения

В соответствии с требованиями инструкций в отчетах, представляемых в ГКЗ и ТКЗ для утверждения запасов полезных ископаемых, должны быть также указаны и источники водоснабжения будущих шахт, рабочих поселков при них и промышленных предприятий. Поэтому при организации работ для разведки полезного ископаемого приходится также организовывать специальные гидрогеологические исследования для обоснованного решения вопросов водоснабжения будущих предприятий.

В результате проведения гидрогеологических работ должны быть с исчерпывающей полнотой соответственно стадии проектирования освещены следующие вопросы (помимо общегеологических): наличие и распространение водоносных горизонтов и условия их залегания, глубина, мощность, водопроницаемость; условия питания и формирования подземных вод района исследований; физические свойства и химический состав источников водоснабжения; количество эксплуатационных запасов с указанием контуров, в пределах которых подсчитаны эти запасы; режим подземных вод в естественных условиях и при эксплуатации; рекомендуемые участки размещения водозаборных сооружений и их тип; необходимые границы зон санитарной охраны; другие гидрогеологические и инженерно-геологические данные, необходимые для проектирования и строительства водозаборных сооружений (обычно для получения этих данных проводятся особые исследования по специальным указаниям проектных организаций).

Источники водоснабжения. Источниками водоснабжения могут быть: поверхностные воды рек, озер и водохранилищ, подземные воды (грунтовые, артезианские, карстовые, трещинные).

При прочих равных условиях лучшими источниками для водоснабжения являются подземные воды как наиболее ценные по качеству и надежные в санитарном отношении. Лучшими питьевыми водами являются подземные воды, приуроченные к рыхлым осадочным породам; они фильтруются через поры пород и благодаря этому очень быстро естественно очищаются.

Поиски и разведка подземных вод для водоснабжения проводятся в соответствии с требованиями инструкции [13]. Подземные воды подразделяются на следующие группы: источники, грунтовые и неглубокие (до 50 *м*) напорные воды, артезианские воды.

Изучение источников осуществляется главным образом путем проведения комплексной геолого-гидрогеологической съемки, разбуривания и расчисток мест выхода источников и режимных наблюдений над дебитом, температурой и химическим составом вод. В районах многолетней мерзлоты съемка должна проводиться в зимнее время. Масштаб съемки определяется стадией исследований и категорией запасов, представляемых к утверждению.

Изучение грунтовых и неглубоких напорных вод, помимо комплексной геолого-гидрогеологической съемки, проводится, как правило, с помощью разведочных скважин, расположенных по поперечникам перпендикулярно потоку подземных вод, а также одиночных или кустовых гидрогеологических скважин, располагаемых на участках, где водообильность пород наибольшая. Из гидрогеологических скважин проводятся опытные и пробно-эксплуатационные откачки, причем последние в течение не менее одного-двух месяцев при одном заданном понижении с целью определения устойчивости дебита, химического и газового состава вод.

Изучение артезианских вод в недостаточно изученных районах, помимо комплексной съемки, проводится с помощью разведочных и гидрогеологических скважин, а в изученных районах — только с помощью гидрогеологических скважин, которые используются затем и как эксплуатационные, почему их называют также разведочно-эксплуатационными. Комплексная съемка необходима для складчатых районов и районов со сложными тектоническими условиями и должна проводиться перед закладкой разведочных скважин. В хорошо изученных артезианских бассейнах проведение съемки не обязательно. Подробно виды гидрогеологических исследований, объемы работ и методика их выполнения описываются в многочисленной специальной литературе и методических руководствах [7, 13, 16, 19, 30, 32, 45 и др.].

§ 65. Понятие о методах подсчета запасов подземных вод

Подсчет запасов подземных вод является конечным итогом их разведки. Но если при разведке подземных вод на месторождениях полезных ископаемых определение этих запасов необходимо для

определения притоков воды в горные выработки и обычно эти запасы косвенно учитываются методами, с помощью которых определяются притоки воды, то при разведке подземных вод для целей водоснабжения подсчет их запасов является самостоятельной и очень важной задачей. На основе подсчитанных запасов решаются все вопросы практического использования подземных вод для водоснабжения (типы водозаборов, размещение их в плане, режим работы, конструкция водоподъемных сооружений и т. п.).

Запасы подземных вод по видам подразделяются на естественные, эксплуатационные и искусственные [7, 13, 30]. Естественные запасы представляют собой количество подземной воды, находящейся в порах и трещинах изучаемого водоносного горизонта в статическом состоянии или движущейся в естественных условиях. Под эксплуатационными запасами понимается количество подземных вод, которое может быть получено рациональными в технико-экономическом отношении водозаборами в течение всего расчетного срока работы водозабора. Искусственные запасы подземных вод образуются путем устройства искусственных сооружений, обеспечивающих питание подземных вод за счет атмосферных осадков, поверхностного стока или путем конденсации.

В § 30 указывалось, что в результате многолетней откачки подземных вод для целей водоснабжения, при ведении горных работ и вообще в результате хозяйственной деятельности человека в наиболее густонаселенных районах запасы подземных вод систематически уменьшаются, что самым отрицательным образом сказывается на питьевых нуждах населения. Например, в США свыше 1000 городов испытывают недостаток воды.

Истощение естественных запасов подземных вод обусловило необходимость разработки способов их искусственного восполнения. В настоящее время уже в больших масштабах (но еще недостаточных) во многих странах, в том числе и в СССР, запасы подземных вод искусственно восполняются («фабрики подземных вод»), для чего на реках создаются водохранилища, из которых устройством специальных траншей, галерей, канав, борозд, открытых колодцев, систем нагнетательных колодцев и скважин вода подается в водоносные горизонты (безнапорные и напорные).

Сравнительно небольшой опыт работы в области искусственного восполнения запасов подземных вод в нашей стране обобщен в книге Н. Н. Фаворина «Искусственное пополнение запасов подземных вод» (изд-во «Наука», 1967), а также освещается в многочисленных журнальных статьях.

Методы подсчета запасов подземных вод различны и зависят от природных геолого-гидрогеологических особенностей месторождений подземных вод; подробно они изложены в соответствующих руководствах [5, 7, 8, 31, 45, 50 и др.].

Следует отметить, что длительная эксплуатация водоносных горизонтов, особенно в рыхлых аллювиальных отложениях, приводит к уплотнению пород и осадке поверхности земли, достигающе

нередко 3—4 м. Поэтому при проектировании крупных водозаборов следует предусматривать возможные осадки территории в сфере влияния водозабора.

§ 66. Охрана подземных вод

Подземные воды, используемые для водоснабжения, необходимо предохранять от истощения, загрязнения и заражения. Предохранение от истощения достигается в общем случае при условии, если отбор воды из водоносного горизонта (расход) не превышает количество воды, поступающей в горизонт (питание). Иногда отбор воды из водоносного горизонта может производиться в объеме, превышающем питание водоносного горизонта. В таких случаях устанавливается предельно допустимое снижение уровня водоносного горизонта, которое будет происходить в результате эксплуатации.

Заражение и загрязнение подземных вод в водозаборе происходит в связи с поступлением в эксплуатируемый водоносный горизонт каких-либо сточных вод от вблизи расположенных выгребных ям, скотных дворов, свалок и промстоков. Поэтому во всех странах вблизи источников подземных вод, эксплуатируемых для водоснабжения, устанавливаются з о н ы с а н и т а р н о й о х р а н ы, т. е. специально выделенные территории, в пределах которых создается особый режим, исключающий возможность загрязнения и ухудшения качественного состава воды, а также не допускается истощение подземных вод, что может быть обусловлено производством вблизи водозабора горных работ, осушительных мероприятий и т. п. Санитарный режим в зонах охраны устанавливается в зависимости от местных санитарных и гидрогеологических условий.

В СССР для охраны источников водоснабжения установлены следующие зоны санитарной охраны с соответствующим режимом.

П е р в а я з о н а, или з о н а с т р о г о г о р е ж и м а, охватывает водозаборные сооружения, водопровод и прочие сооружения, расположенные на территории, непосредственно примыкающей к водозабору.

В т о р а я з о н а, или з о н а о г р а н и ч е н и й, определяется по результатам санитарно-технического обследования территории, где находится область питания водоносного горизонта и где возможно загрязнение или заражение источников водоснабжения. Во второй зоне осуществляются постоянный санитарный надзор и лабораторный контроль всех стоков, а также контроль работы сооружений по очистке сточных вод.

Т р е т ь я з о н а, или з о н а н а б л ю д е н и й, примыкает ко второй зоне; границы этой зоны устанавливаются исходя из характера местности, геологического строения, гидрогеологических условий, характера источника и других условий. В зоне наблюдений никаких ограничений не вводится. Устанавливается только усиленное

санитарно-эпидемиологическое наблюдение за распространением инфекционных желудочных заболеваний.

Зоны санитарной охраны утверждаются органами Государственной санитарно-технической инспекции (ГСТИ).

§ 67. Применение геофизических методов при гидрогеологических исследованиях

В гидрогеологии в настоящее время широко применяются геофизические методы для решения разнообразных задач. Они наиболее эффективны при региональных гидрогеологических исследованиях, помогая гидрогеологам в решении следующих основных задач: изучении геологических структур, выявлении и прослеживании тектонических зон разломов, закарстованных зон, прослеживании погребенных долин, что позволяет затем более обоснованно определять местоположение гидрогеологических скважин; определении глубины залегания подземных вод и степени их минерализации; определении направления и скорости движения потока подземных вод; выделении линз пресных вод, «плавающих» на сильно минерализованных; выделении минерализованных пластовых вод; выявлении минеральных вод, циркулирующих по зонам разломов или разгружающихся в долинах рек под аллювием; исследованиях многолетнемерзлых пород и мерзлых линз среди талых пород; изучении режима подземных вод; уточнении литологического состава пород и степени их обводненности в скважинах, пробуренных с применением глинистого раствора (каротаж скважин); установлении форм депрессионных воронок при опытных и эксплуатационных откачках.

Из перечисленного следует, что при дальнейшем совершенствовании методов геофизических исследований и аппаратуры применение геофизики при гидрогеологических исследованиях будет все более расширяться, точность получаемых данных будет все более высокой, стоимость работ значительно меньшей, а сроки выполнения более короткими.

Подробно разнообразные геофизические методы, применяемые при гидрогеологических исследованиях, излагаются в многочисленных специальных работах (А. М. Горелика, В. Н. Дахнова, Б. К. Матвеева, А. А. Огильви и др.).

§ 68. Содержание и объем гидрогеологических и инженерно-геологических исследований для разных стадий разведки месторождений

Содержание и объем гидрогеологических и инженерно-геологических исследований устанавливаются в зависимости от сложности геологических и гидрогеологических условий разведуемого месторождения, а также от стадии разведки [34, 35, 41].

Поисковая разведка (второй этап разведочных работ). На этой стадии гидрогеологическая и инженерно-геологическая

характеристика дается на основе макроскопического описания пород по керну (с полевой инженерно-геологической оценкой пород), по замерам уровней в некоторых опорных поисково-разведочных скважинах, по данным химического анализа проб воды, отбираемых из наиболее характерных водопунктов. Должны быть также широко использованы фондовые материалы и литературные источники по району работ. На этой стадии следует в большой степени использовать метод аналогий, для чего должны быть обследованы все действующие вблизи шахты или карьеры и собраны нужные материалы по геологии, гидрогеологии и инженерной геологии действующих горных предприятий.

Предварительная разведка (первая стадия третьего этапа разведочных работ). Гидрогеологическая и инженерно-геологическая характеристика месторождения дается на основе следующих данных: комплексной гидрогеологической и инженерно-геологической съемки в масштабе 1 : 50 000—1 : 25 000; определения статических уровней воды основных водоносных горизонтов в разведочных (при возможности) и гидрогеологических скважинах с производством из последних откачек. Для сложных и очень сложных условий бурятся специально оборудуемые гидрогеологические скважины, располагаемые в наиболее характерных по гидрогеологическим и инженерно-геологическим условиям пунктах. Из этих скважин производятся опытные откачки, а затем скважины оборудуются для проведения в них наблюдений за режимом подземных вод. В гидрогеологических скважинах отбираются образцы пород с нарушенной структурой, а если разработка будет вестись карьерами, — монолиты из каждой геолого-литологической разности; при мощности связных пород свыше 3 *м* монолиты отбираются через каждые 2—3 *м*. На образцах-монолитах в лаборатории определяются показатели физико-механических свойств пород (см. § 17).

Применительно к разведке пластовых месторождений одиночные гидрогеологические скважины бурятся из расчета одна скважина на 4 *км*^{2} площади, с опробованием всех основных водоносных горизонтов. При разведке жильных месторождений гидрогеологические скважины располагаются так, чтобы они пересекали зоны тектонических нарушений и водоносные дайки, особенно, если тектонические трещины и водоносные дайки выходят в руслах поверхностных водотоков (постоянных или временных) и под дном водоемов.

При бурении всех разведочных скважин, независимо от сложности, необходимо вести точный учет поглощения промывочной жидкости, выхода керна и изучать литологический состав, степень трещиноватости, выветрелости и закарстованности пород. Эти данные в совокупности с другими позволяют более достоверно оценить месторождение в гидрогеологическом и инженерно-геологическом отношении.

Детальная разведка (вторая стадия третьего этапа разведочных работ). При простых гидрогеологических и инженерно-геологических условиях проводятся комплексная съемка в масштабе

1 : 25 000—1 : 1000 и замеры статических уровней по возможности во всех разведочных скважинах.

Для месторождений со средней сложностью, помимо указанного, проводятся откачки из одиночных гидрогеологических скважин из всех основных водоносных горизонтов; скважины закладываются в наиболее характерных пунктах. При намечаемом открытом способе разработки из гидрогеологических скважин отбираются монолиты рыхлых пород, по которым в лаборатории определяются показатели физико-механических свойств по полному комплексу.

При сложных условиях съемка проводится в масштабе 1 : 5000—1 : 1000. Статические уровни определяются для всех водоносных горизонтов в разведочных и гидрогеологических скважинах. Одиночные гидрогеологические скважины бурятся в среднем одна на 1 км²; в этих скважинах проводятся опытные откачки, а затем их оборудуют для изучения режима подземных вод продолжительностью не менее года. Монолиты отбираются из гидрогеологических скважин из пород, вмещающих полезное ископаемое (на 10 м выше кровли и на 5 м ниже почвы). Для участков открытых разработок монолиты отбираются из всех пород, покрывающих полезное ископаемое в порядке, описанном выше; в лаборатории анализы проводятся по полному комплексу.

При очень сложных гидрогеологических условиях в дополнение к указанным работам разбуриваются кусты на основные водоносные горизонты, из расчета два-три куста на шахтное поле. Кусты закладываются в местах наличия наиболее мощных водоносных горизонтов, в местах мульдообразных понижений, на участках максимальной закарстованности и трещиноватости известняков. Режим и баланс подземных вод целесообразно изучать в течение не менее двух лет; сеть стационарных наблюдательных скважин располагается по поперечникам в направлении потока подземных вод. Наблюдательные скважины закладываются отдельно на все основные водоносные горизонты, поблизости одна от другой.

Не исключено, что после стадии детальной разведки в зависимости от специфических особенностей месторождения могут потребоваться дополнительные исследования, которые проводятся в процессе рабочего проектирования горного предприятия по специальной программе.

В последнее время важное значение приобрели гидрогеологические исследования для сброса промышленных сточных вод, не поддающихся очистке, и устройства искусственных подземных газохранилищ. Проблема сброса промстоков в недра земли очень сложна и представляет собой новое направление в гидрогеологии, находящееся в начальной стадии развития.

Сброс промышленных сточных вод в глубокие надежно изолированные водоносные горизонты, не представляющие какой-либо практической ценности, является наиболее эффективным и надежным способом борьбы с загрязнением поверхностных и ценных подземных вод. Этот способ уже применяется для захоронения стоко-

нефтеперерабатывающих заводов и других промстоков в Советском Союзе, США и в других странах.

Сброс сточных вод возможен при следующих условиях: наличии водоносных горизонтов, вмещающих подземные воды, не пригодные для какого-либо использования; достаточной приемистости поглощающих горизонтов, их значительной площадной распространенности и мощности; наличии в кровле и почве поглощающих горизонтов водоупорных толщ, изолирующих поглощающие слои от водоносных горизонтов, включающих ценные воды.

Для изучения условий сброса промстоков проводятся специальные гидрогеологические исследования, включающие: изучение геологического строения и гидрогеологических условий района, где намечается сброс промстоков; бурение опытных скважин и проведение опытно-исследовательских работ по определению приемистости и других гидрогеологических параметров поглощающего пласта; лабораторные исследования для определения физических и водных свойств поглощающего пласта, а также пород кровли, почвы и влияния на них сточных вод; физико-химические исследования по изучению взаимодействия промстоков и подземных вод поглощающего горизонта; гидрогеологические расчеты на основании материалов полевых и лабораторных опытно-исследовательских работ по определению необходимого количества поглощающих скважин, их расположения в плане, определения конструкции скважин, давления при закачке промстоков и т. п.; опытные закачки промстоков в течение двух-трех месяцев и более при режиме, соответствующем эксплуатационным условиям, и при наличии системы наблюдательных скважин.

В зависимости от гидрогеологических особенностей района исследований, важности проектируемого объекта, объема промстоков и других факторов виды гидрогеологических разведочных работ, их объем и методика бывают различными.

При устройстве газохранилищ в процессе проведения опытно-исследовательских работ необходимо точно определять значения коэффициента пьезопроводности, а по наблюдательным скважинам — изменение давления в зависимости от давления в опытных скважинах.

Для сброса промстоков наиболее перспективны нефтеносные структуры, на которых добыча нефти уже прекращена.

ГЛАВА XVII

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

§ 69. Задачи исследований

В СССР инженерно-геологические исследования обязательны при проектировании и строительстве всех объектов: железных и автомобильных дорог, жилых и промышленных зданий, гидротехнических сооружений, горных предприятий, карьеров по добыче

полезных ископаемых и т. п. Это обусловливается тем, что инженерно-геологические условия в большинстве случаев оказывают решающее влияние на размещение и конструкцию проектируемых сооружений, технологию производства строительных работ и стоимость строительства.

Под инженерно-геологическими условиями понимается сложный комплекс природных процессов и явлений в их взаимном сочетании и взаимодействии, которые прямо или косвенно могут влиять на условия строительства и эксплуатацию различных объектов: геоморфология и рельеф района; условия залегания, строение и состав толщ горных пород; глубина залегания, мощность, водопроницаемость водоносных пород, физические свойства и химический состав подземных вод; физическое состояние (степень выветрелости, трещиноватость, структурные и текстурные особенности) и физико-механические свойства горных пород; физико-геологические процессы и явления (эрозия, абразия, карст, оползни, просадочные явления), развитие которых в свою очередь тесно связано с климатом, гидро- и биосферой. Изучение всех этих процессов для инженерно-геологических целей требует широкого комплексного подхода, учитывающего сложную систему взаимодействия и взаимосвязей, существующих в природе.

Если выбор, например, трассы дороги определяется общим планом развития народного хозяйства страны, то размещение конкретных объектов (выемок, насыпей, мостов и других объектов) в пределах данного района и участка в основном определяется инженерно-геологической обстановкой. Только тщательный учет инженерно-геологических условий дает возможность обосновать наиболее целесообразное размещение проектируемых сооружений, их размеры, конструкцию и при наличии неблагоприятных природных факторов наметить и осуществить необходимые профилактические мероприятия, обеспечивающие устойчивость, долговечность и надежность работы конкретного сооружения.

Проектирование различных сооружений в нашей стране проводится в несколько стадий: стадию технико-экономического обоснования — ТЭО (при изысканиях железных дорог) или стадию составления технико-экономического доклада — ТЭД (при изысканиях для других видов строительства); стадию составления проектного здания; стадию составления рабочего проекта. В зависимости от вида строительства (гражданского, промышленного, дорожного, гидротехнического и др.), района строительства (хорошо или плохо изученного и обжитого), капитальности сооружений и учета других факторов число стадий и их наименование бывают различными. Цели и содержание отдельных стадий проектирования, а тем самым и инженерно-геологических исследований изложены в соответствующих инструктивных указаниях, разработанных для каждого вида строительства (дорожного, городского, гидротехнического и др.). Однако в принципиальных положениях они мало отличаются друг от друга. На поздних стадиях все более уточняются местоположение

объекта, конструкция сооружения, технология производства строительных работ и стоимость сооружения.

На стадии ТЭД на основе сопоставления технико-экономических и геологических данных по нескольким вариантам выбираются наиболее благоприятные участки для дальнейших исследований и последующего составления проектного задания. На этой стадии проектирования инженерно-геологическое обоснование дается на основе изучения имеющихся архивных материалов и литературных источников.

Инженерно-геологические исследования на стадии проектного задания выполняются в пределах выбранных участков и имеют целью выбор определенной площадки для строительства данного объекта. Полученные данные позволяют проектировщикам обосновать компановку основных и вспомогательных сооружений, выбрать тип и конструкцию основных сооружений, разработать наиболее рациональную технологию производства земляных работ и решить ряд других вопросов. Освещение инженерно-геологических условий места строительства и их практическая оценка на данной стадии изысканий должны отличаться такой полнотой, чтобы в дальнейшем не возникла необходимость в существенных изменениях и переработка основных положений проектного задания. Инженерно-геологические изыскания в эту стадию проводятся на нескольких конкурирующих участках, что позволяет выбрать наилучшую площадку, которая затем уже детально изучается на следующей стадии проектирования.

Инженерно-геологические исследования для стадии рабочего проектирования проводятся только на окончательно выбранной стройплощадке. Круг вопросов, решаемых при исследованиях на этой стадии, такой же, как и в предыдущей, но расположение горных выработок, опытно-исследовательские и прочие работы приурочиваются к контурам расположения или осям отдельных сооружений, тип которых, конструкция фундаментов и т. п. установлены на основе данных, полученных в предыдущую стадию. Основное внимание при этом обращается на изучение физико-механических свойств грунтов с целью уточнения расчетов прочности и устойчивости проектируемых сооружений, расчетов по устойчивости откосов выемок и насыпей, бортов карьеров и т. п.

Инженерно-геологические исследования проводятся в соответствии с программой этих работ, разрабатываемой инженером-геологом на основе тщательного изучения литературных и архивных источников, освещающих природные условия района строительства. В программе в соответствии с техническим заданием, получаемым от проектирующей организации, должны быть четко намечены и обоснованы все виды и объемы инженерно-геологических работ, методика их выполнения, сроки, стоимость, перечень необходимого оборудования и пр.

В техническом задании, выдаваемом проектирующей организацией, излагаются техническая схема строительства, примерная схема компановки основных и вспомогательных сооружений, возможные

варианты размещения, габариты и конструкции фундаментов отдельных сооружений, особые требования к методике изучения грунтов, сроки представления промежуточных и окончательных отчетов. Программа инженерно-геологических исследований согласуется с проектирующей организацией, выдавшей техническое задание. В процессе выполнения работ геолог при необходимости должен уточнять виды работ, изменять объемы и методику полевых и лабораторных опытных исследований, согласовывая все это с проектирующей организацией, с которой он должен быть постоянно тесно связан.

§ 70. Виды работ и их особенности

Инженерно-геологическая съемка. Съемка является комплексной. При ее проведении изучаются: геологическое строение картируемой территории (стратиграфия, тектоника, литология, почвенный покров, трещиноватость, степень выветрелости горных пород); геоморфологические особенности изучаемой площади; гидрогеологические условия территории (наличие водоносных горизонтов, глубина их залегания, наличие напора, характер движения подземных вод, их химический состав и т. п.); физико-геологические процессы и явления. Кроме того, обследуются существующие в районе съемки сооружения с подробным описанием обнаруженных в них деформаций, выясняются (по возможности) причины, обусловившие эти деформации, описываются осуществленные профилактические мероприятия и степень их эффективности; проводятся поиски и разведка строительных материалов. По данным инженерно-геологической съемки дается общая оценка изученной территории с точки зрения возможности использования исследованной площади для строительства проектируемых сооружений.

Инженерно-геологическая съемка ведется по методике, принятой в геологии; но все изучаемые при этом факторы (геологическое строение, геоморфология, гидрогеологические условия, физико-геологические явления и пр.) анализируются и оцениваются с учетом того, какое влияние они будут оказывать на условия строительства и эксплуатацию проектируемых сооружений.

При проведении инженерно-геологической съемки в зависимости от стадии проектирования, что обусловливает выбор масштаба съемки, проходятся также вспомогательные горноразведочные выработки — расчистки, канавы, неглубокие шурфы и зондировочные скважины, помогающие изучать геологическое строение слабо обнаженных территорий.

Инженерно-геологическая съемка предшествует всем другим видам работ, проводимым при инженерно-геологических исследованиях, являясь основой для правильного выбора видов, методики и последовательности проведения разведочных, опытных, лабораторных, стационарных и других работ. В зависимости от характера проектируемых объектов и сложности инженерно-геологической обстановки масштаб съемки и составляемые при этом инженерно

геологические карты изменяются в значительном диапазоне: от обзорных (1 : 50 000—1 : 25 000) до детальных (1 : 2000). Обычно съемка в более крупном масштабе проводится на участках со сложными инженерно-геологическими условиями. На стадии рабочего проектирования инженерно-геологическая съемка всегда является детальной.

В последние годы при инженерно-геологической съемке при мелко- и среднемасштабном картировании стали широко применяться аэрофотосъемка и аэровизуальные наблюдения, а также аэрогеофизические методы (метод «радиокип» в воздушном варианте).

Сущность этих методов изложена в специальной литературе [6, 44].

По результатам инженерно-геологической съемки составляются инженерно-геологические карты и разрезы, которые вместе с приложенными к ним таблицами и легендой являются основным документом, характеризующим инженерно-геологические условия засиятой территории, разделяемой на картах на районы, подрайоны и участки, пригодные, условно пригодные и не пригодные для строительства тех или иных объектов.

Геологоразведочные работы. При инженерно-геологических исследованиях геологоразведочные работы являются основным средством разведки и изучения грунтов на требуемую глубину. Проходка расчисток, канав, шурфов, шахт, штолен, квершлагов и бурение скважин позволяют детально установить геологическое строение исследуемой территории, наличие подземных вод, отобрать образцы грунтов и пробы воды для лабораторных исследований их свойств, провести полевые опытно-исследовательские работы (откачки, опыты на сжатие грунтов и др.), организовать стационарные наблюдения за режимом подземных вод и т. п. Разведочные работы занимают первое место по трудоемкости и стоимости в общем комплексе инженерно-геологических исследований. Данные разведочных работ совместно с данными других исследований позволяют оценить грунты как основания сооружений, как среду, в которой будут возводиться те или иные объекты (выемки, туннели и др.), и как материал для возведения насыпей и подобных сооружений, дают возможность детально разведать месторождения ископаемых строительных материалов.

Роль геологоразведочных работ особенно важна в районах слабой обнаженности и на участках развития сложных физико-геологических процессов (оползней, карста и т. п.), где условия строительства и эксплуатации будут особо неблагоприятными. В большом объеме геологоразведочные работы выполняются на стройплощадках, где будут строиться наиболее ответственные объекты (большие мосты, туннели), в местах индивидуального проектирования земляного полотна, а также при разведке месторождений полезных ископаемых.

Опытные работы. Полевые опытные инженерно-геологические исследования проводятся с целью получения достоверных характеристик деформируемости и прочностности пород в условиях

их естественного залегания. Показатели деформируемости и прочности, как уже указывалось, используются для расчета осадки сооружений, устойчивости откосов карьеров, давления грунтов на подпорные сооружения, на крепь в горных выработках и т. п. Определение этих характеристик в лабораториях на монолитах не полностью характеризует состояние и свойства пород в массиве, так как извлечение монолита из выработки всегда сопровождается неизбежным разуплотнением, изменением влажности и газового состава, т. е. нарушением естественной структуры и состояния грунта. Полевые же испытания всегда дают более достоверные значения параметров деформируемости и прочности грунтов. Современные методы полевых испытаний свойств грунтов позволяют относительно быстро с малой затратой времени и материальных средств получать искомые данные, что дает возможность проводить эти исследования во многих точках массива в относительно короткие сроки, обрабатывать получаемые результаты методами математической статистики и получать обобщенные и расчетные значения показателей сопротивления грунтов сжатию, сдвигу и др.

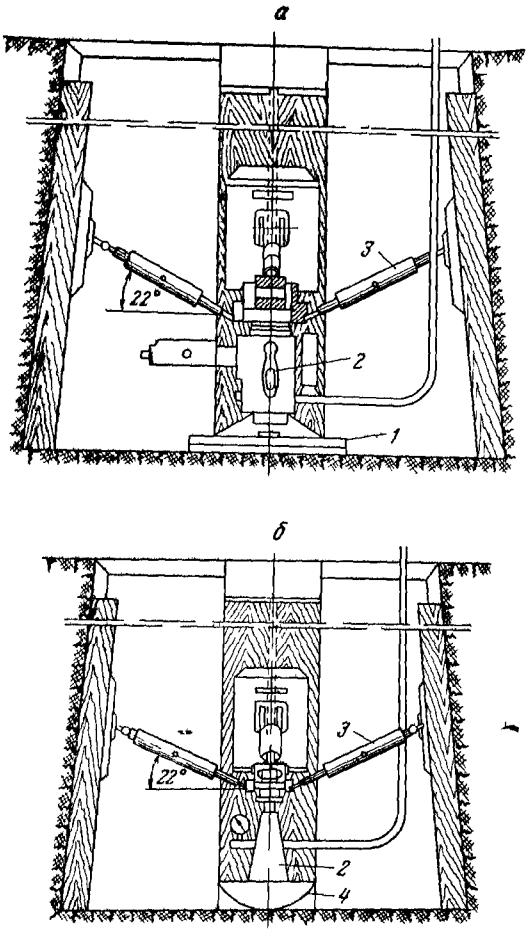


Рис. 66. Установка с плоским (*а*) и сферическим (*б*) штампами

1 — плоский квадратный штамп; *2* — гидродомкрат; *3* — упоры в стенки шурфа; *4* — сферический штамп

Основными видами полевых испытаний грунтов, проводимых при инженерно-геологических исследованиях, являются: опытные гидрогеологические работы, пробные нагрузки в шурфах и скважинах, динамическое и статическое зондирование, определение в скважинах сопротивления грунтов сдвигу; определение плотности и влажности грунтов при помощи радиоактивных изотопов.

Пробные нагрузки в шурфах или скважинах позволяют определять сопротивление грунтов сжатию. Испытания проводятся при помощи специальных установок, передающих через штампы нагрузки на грунты. Испытание грунтов штампами в шурфах является наиболее достоверным. Однако для проведения таких испытаний требуются довольно громоздкие установки, вследствие чего определение сопротивления грунтов сжатию в шурфах проводится только при исследованиях под строительство капитальных сооружений.

В соответствии с ГОСТ 12374—66. «Грунты. Методы полевого испытания статическими нагрузками» стандартными при испытаниях в шурфах являются штампы площадью 5000 $см^2$. Плотные пески и глинистые грунты твердой и полутвердой консистенции рекомендуется испытывать штампами площадью 2500 $см^2$.

Для испытаний грунтов пробными нагрузками в шурфах имеются установки различных конструкций: платформенного типа, с винтовыми анкерными сваями, с упором в стенки шурфа, подробно описываемые в специальной литературе [6, 21, 44, 48].

На рис. 66 изображена схема установки с программным управлением для испытания грунтов в шурфах плоским и сферическим штампами, сконструированной в Институте строительства и архитектуры Госстроя БССР (И. И. Большедонов, П. А. Макарчук и Е. Ф. Винокуров). Сферический штамп применяется для испытания слабых глинистых пород и торфяников.

Испытания грунтов пробными статическими нагрузками в шурфах позволяют определять модуль деформации грунтов для различных интервалов давления на грунты, который является основным показателем, характеризующим деформируемость грунтов в основании сооружений и используется для расчета осадок зданий, мостов и других сооружений. Модуль деформации E по данным испытаний определяется по формуле

$$E = (1-\mu^2)\,\omega \cdot d\,\frac{\Delta P}{\Delta S}, \qquad (67)$$

где μ — коэффициент Пуассона, принимаемый равным 0,27 для крупноблочных пород, 0,30 — для песков и супесей, 0,35 — для суглинков и 0,42 — для глин;

ω — безразмерный коэффициент, равный 0,8;

d — диаметр штампа, *см*;

ΔP — приращение удельной ступени нагрузки на штамп между $P_б$ и P в $кГ/см^2$, где $P_б$ — бытовое давление, P — ступень нагрузки;

ΔS — приращение осадки штампа в *см*, соответствующее ΔP.

Испытания грунтов пробными нагрузками на глубинах свыше 3 *м* проводятся в скважинах. Для глубинных испытаний имеются установки различных конструкций; с нагружаемой подвесной платформой, с анкерными сваями и др. На рис. 67 изображена схема установки с программным управлением для испытания грунтов в скважине, сконструированной в Институте строительства и архитектуры

Госстроя БССР (авторы те же). Установка позволяет испытывать грунты в скважине на глубинах до 10 *м* круглым жестким штампом площадью 600 *см*². Максимальное удельное давление на грунт до 20 *кГ/см*², вес установки в комплекте 200 *кг*, вес отдельного узла не более 30 *кг*, наибольшая длина отдельного узла не более 1,8 *м*.

Динамическое и статическое зондирование. В ближайшие годы инженерно-геологические исследования для проектирования и строительства различных сооружений будут проводиться с широким применением новых весьма эффективных методов определения строительных свойств грунтов — зондированием, вращательным срезом и прессиометрией. Метод зондирования, или пенетрации, основан на свойстве грунтов оказывать различное сопротивление внедрению в них твердого тела — наконечников разнообразных форм и размеров.

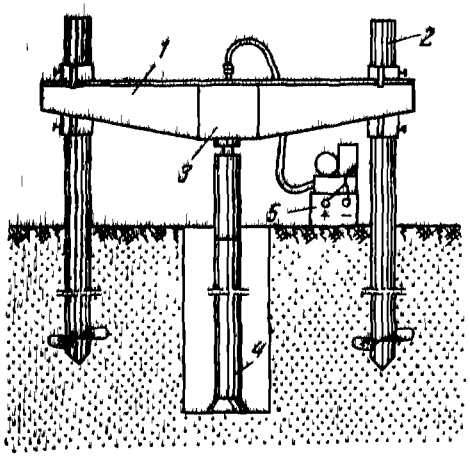


Рис. 67. Автоматизированная установка для испытания грунтов в скважинах

1 — упорная балка; *2* — анкерная свая; *3* — гидродомкрат; *4* — опорная часть штампа, *5* — автоматическое устройство

В ближайшем будущем по мере изготовления и серийного выпуска стандартного оборудования методы динамического и статического зондирования дадут возможность быстро, дешево и надежно решать следующие задачи: устанавливать на нужную глубину геологический разрез; определять показатели физико-механических свойств грунтов; на основе показателей физико-механических свойств определять допускаемые давления на грунты основания; рассчитывать несущие свойства свайных оснований; давать оценку разрабатываемости и разрыхляемости грунтов различными землеройными механизмами.

Динамическое зондирование в настоящее время применяется преимущественно для исследования песчано-галечниковых грунтов, статическое применимо для всех разностей грунтов. Динамическое зондирование отличается простотой методики и несложностью применяемого оборудования (рис. 68). Для статического зондирования требуется более сложное оборудование (рис. 69).

В настоящее время отсутствует стандартная методика определения физико-механических показателей свойств грунтов по результатам динамического зондирования, имеются лишь предложения отдельных авторов, излагаемые в специальной литературе [6, 21, 44, 48].

Статическое зондирование является более эффективным методом исследования свойств грунтов в условиях их естественного залегания. Зондирование осуществляется вдавливанием (с помощью домкрата) конического наконечника, опускаемого в скважину на штангах. По результатам статического зондирования ориентировочно определяются плотность песчаных грунтов и модуль деформации грунта. Плотность песчаных грунтов ориентировочно определяется по величине удельного сопротивления грунта погружению конуса

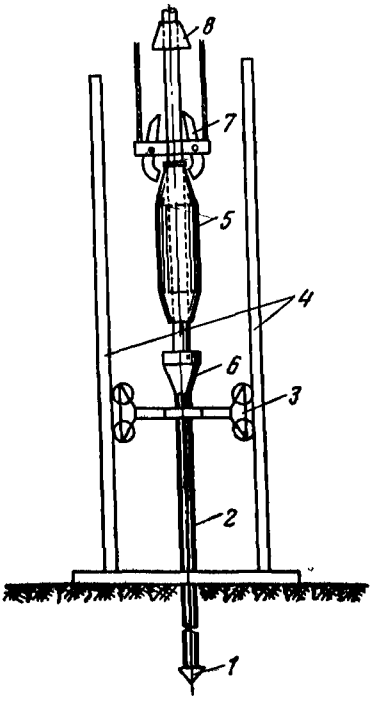


Рис. 68. Схема установки для динамического зондирования

1 — наконечник; *2* — штанга; *3* — каретка; *4* — направляющие; *5* — молот; *6* — подбабок; *7* — захват; *8* — фиксатор

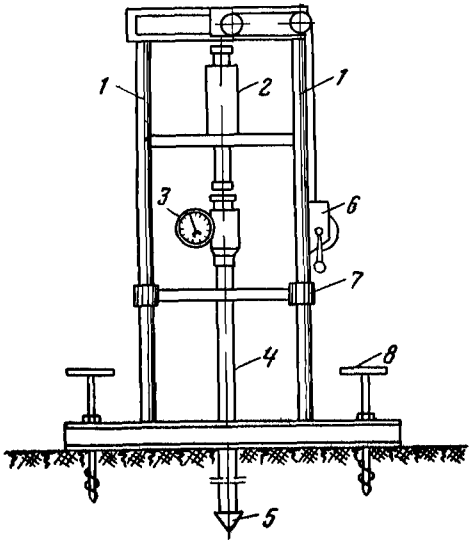


Рис. 69. Схема установки для статического зондирования

1 — направляющие; *2* — домкрат; *3* — динамометр; *4* — штанга; *5* — наконечник; *6* — лебедка; *7* — каретка; *8* — винтовая свая

Таблица 11

Плотность грунтов по результатам статического зондирования

Глубина зондирования, м	Крупный		Средней крупности		Мелкий	
	плотный	средней плотности	плотный	средней плотности	плотный	средней плотности
	Удельное сопротивление кГ/см²					
5	>150	150—100	>100	100—60	>60	60—30
10	>220	220—150	>150	150—90	>90	90—40

площадью 10 $см^2$ на различных глубинах; плотность грунтов для глубин 5 и 10 $м$ приведена в табл. 11.

Пески, у которых удельное сопротивление ниже значений, приведенных в табл. 11, относятся к рыхлым. Консистенция глинистых грунтов сугубо ориентировочно определяется по величине сопротивления погружению конуса: твердая — свыше 100 $кГ/см^2$; полутвердая — 100—50, тугопластичная — 50—20, мягкопластичная — 20—10, текучепластичная — меньше 10 $кГ/см^2$. Модуль деформации песчаных грунтов определяется по формуле

$$E = 2{,}5\sigma_л, \qquad (68)$$

где $\sigma_л$ — удельное (лобовое) сопротивление грунта погружению конуса, $кГ/см^2$.

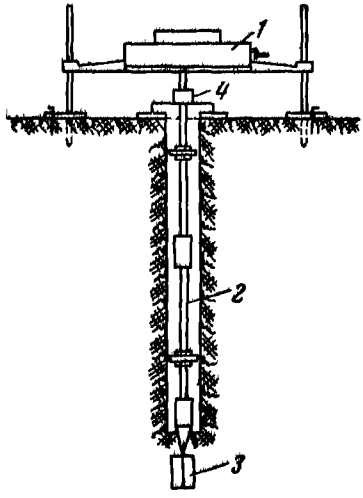


Рис. 70. Схема лопастной установки УИГС-ЦНИИС-2
1 — оперативный столик; *2* — штанга; *3* — рабочий наконечник, *4* — подвеска

Для определения модуля деформации и сцепления связных грунтов по данным статического зондирования еще не предложены надежные методы.

В заключение следует отметить, что в настоящее время ведущие научно-исследовательские организации нашей страны проводят обширные исследования по разработке стандартного оборудования и единой методики динамического и статического зондирования и установлению корреляционных зависимостей между свойствами грунтов, получаемыми по данным зондирования, и их деформационными и прочностными характеристиками, что даст затем возможность обоснованно использовать эти характеристики для расчетов осадок сооружений, устойчивости откосов выемок и т. п.

Определение сопротивления грунтов сдвигу. Испытания грунтов на сдвиг проводятся в скважинах с помощью лопастных установок нескольких моделей. Основными грунтами, в которых испытания лопастными приборами эффективны, являются водонасыщенные глинистые слабой и средней плотности, текучей, текучепластичной и мягкопластичной консистенции, которым обычно присущи и тиксотропные свойства. Сущность лопастных испытаний состоит в том, что в грунт погружают лопастной прибор (иначе он называется крыльчаткой) и поворотом его вокруг оси определяют максимальный крутящий момент, характеризующий сопротивление грунтов сдвигу. Схема лопастной установки показана на рис. 70. Расчетная глубина испытаний до 25 $м$. Размеры лопастей крыльчатки: высота 110, 150 и 200 $мм$; диаметр 55, 75 и 100 $мм$. Вес крыльчатки со штангами до 10 $кг$, оперативного столика 16 $кг$ и стоек к нему 10 $кг$.

Удельное сопротивление сдвигу τ определяется по формуле

$$\tau = \frac{\mu_{макс}}{0{,}5d^2\left(h+\frac{d}{3}\right)}, \qquad (69)$$

где $\mu_{макс}$ — максимальный крутящий момент;
d — диаметр цилиндра вращения, *см*;
h — высота лопасти (цилиндра вращения), *см*.

По окончании испытания, не извлекая прибора, производят пять-шесть полных оборотов крыльчатки и фиксируют значения крутящего момента, соответствующего прочности грунта в нарушенном состоянии, что даст возможность определить так называемую структурную прочность, или «чувствительность» G_r глинистого водонасыщенного грунта по выражению

$$G_r = \frac{\tau_1}{\tau_2}, \qquad (70)$$

где τ_1 — сопротивление сдвигу грунта ненарушенной структуры;
τ_2 — сопротивление сдвигу грунта, перемятого лопастями.

Чувствительность характеризует прочность структуры грунта. По степени чувствительности глинистые грунты подразделяются на малочувствительные ($G_r < 4$), чувствительные ($4 < G_r < 8$) и сверхчувствительные ($G_r > 8$).

Модуль деформации пород определяют по формуле

$$E = \omega\,(1-\mu^2)\cdot\frac{M_0-\tau\cdot d\cdot l\,(2h+1{,}33d)}{0{,}125d^2\cdot h\cdot l}\sqrt{2dh}, \qquad (71)$$

где ω — коэффициент, зависящий от соотношения высоты крыльчатки и ширины ее лопастей; при $h=2d$ $\omega=0{,}92$;
μ — коэффициент Пуассона;
M_0 — крутящий момент в первый момент приложения силы, когда угол поворота лопастей близок к нулю, а усилие затрачивается в основном на сжатие грунта, *кГ/см²*;
τ — удельное сопротивление сдвигу, *кГ/см²*;
d — диаметр цилиндра, по образующей которого происходит срез; равен двойной ширине лопасти, *см*;
h — высота лопасти крыльчатки, *см*;
l — величина перемещения лопасти, *см*.

Для испытаний грунтов комбинированным методом статического зондирования и вращательным срезом на дне шурфов, в траншеях и в обнажениях имеются комбинированные ручные универсальные пенетрометры различных конструкций. Для исследования грунтов с различными прочностными характеристиками применяется набор наконечников, обеспечивающий высокую чувствительность и точность прибора.

Рядом организаций совместно разработан комплекс установок для испытания грунтов комбинированными пенетрационно-каротажными методами при инженерно-геологических исследованиях до

глубины 25 *м* (рис. 71). В подобных установках имеются приборы, позволяющие проводить: гамма-гамма-каротаж (ГГК); нейтрон-нейтронный каротаж (ННК); гамма-каротаж (ГК); статическое зондирование с призабойными датчиками лобового сопротивления и трения грунтов; призабойный отбор образцов грунта специальным

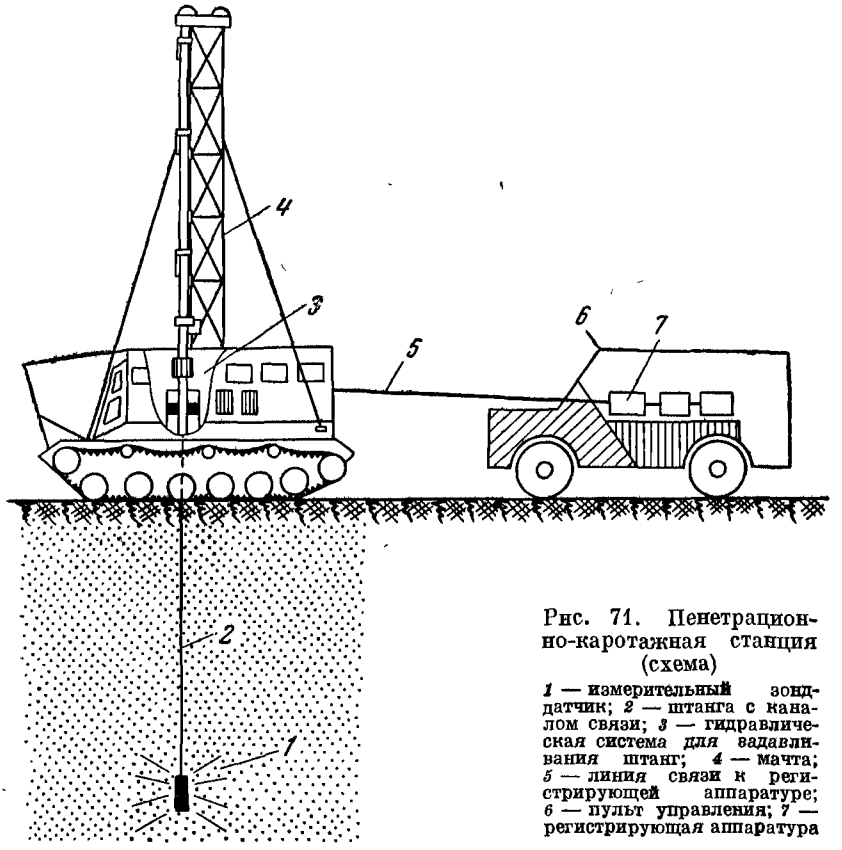


Рис. 71. Пенетрационно-каротажная станция (схема)

1 — измерительный зонд-датчик; *2* — штанга с каналом связи; *3* — гидравлическая система для задавливания штанг; *4* — мачта; *5* — линия связи к регистрирующей аппаратуре; *6* — пульт управления; *7* — регистрирующая аппаратура

пробоотборником. Применение комплекса пенетрационно-каротажных методов дает снижение стоимости инженерно-геологических исследований в 5—6 раз по сравнению с применяемыми другими методами.

Исследования свойств грунтов прессиометром. Перспективным является метод обжатия грунтов в скважине прессиометром (рис. 72). Средняя камера *9* является рабочей, длина ее 170 *мм*, а две крайние (*8* и *10*) длиной 160 *мм* каждая предотвращают выпирание грунта по краям испытываемого участка, являясь пригрузкой. Все три камеры сделаны из резиновых эластичных манжет, надетых на стальные распорные втулки. Максимальное

давление в рабочей камере достигает 7 $кГ/см^2$. Испытания можно проводить на глубинах до 15 $м$. Общая затрата времени на одно испытание менее 1 $ч$. Одно испытание штампом площадью 5000 $см^2$ эквивалентно 10 испытаниям прессиометром.

Исследования грунтов проводят в заранее пробуренной скважине, в которую опускается прессиометр с последующей накачкой в резиновые камеры воды, которые и передают давление (нагрузку) на грунты стенок скважин. По результатам испытания определяется модуль деформации грунта E по формуле

$$E = (1+\mu)\,\lambda \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V}\ кГ/см^2, \quad (72)$$

где μ — козффициент Пуассона;

λ — постоянная для данного прессиометра (определяется при тарировке прибора), $см^3$;

ΔP — изменения давления в рабочей камере;

ΔV — изменения объема рабочей камеры прессиометра, $см^3$.

Определение плотности и влажности грунтов с помощью радиоактивных изотопов. Уже указывалось, что плотность и влажность грунтов являются их важными характеристиками. Зная гранулометрический состав грунтов (что легко определяется на образцах нарушенной структуры) и определив плотность и влажность грунтов в условиях их естественного залегания, можно практически решать все вопросы, возникающие при проектировании и строительстве фундаментов зданий и сооружений III и IV классов, а при проектировании более ответственных сооружений предварительно намечать размеры и конструкции фундаментов на стадии проектного здания.

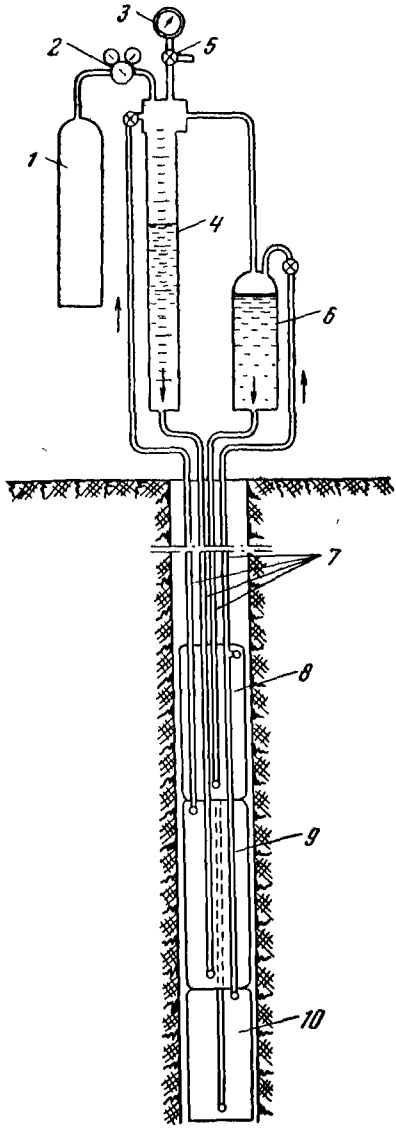


Рис. 72. Схема прессиометра

1 — газовый баллон; *2* — редуктор; *3* — манометр; *4* — измерительный цилиндр; *5* — кран-тройник; *6* — бачок; *7* — шланги; *8*, *10* — вспомогательные камеры; *9* — рабочая камера

Методы определения плотности и влажности грунтов в их естественном залегании с помощью радиоактивных изотопов отличаются простотой, малой трудоемкостью, дешевизной, оперативностью, высокой точностью и детальностью. Для определения плотности грунтов используется гамма-излучение, которое представляет собой жесткие электромагнитные волны. Прохождение гамма-лучей через какое-либо вещество сопровождается различными процессами. Для определения плотности используется процесс рассеяния гамма-излучения на электронах среды, в результате чего происходит частичная потеря энергии гамма-лучей и меняется направление их движения. Коэффициент ослабления гамма-излучения пропорционален плотности среды, через которую проходит излучение, что и дает возможность использовать этот вид излучения для определения плотности грунтов. Рассеивающие свойства рыхлых грунтов по отношению к гамма-излучению зависят только от их плотности, химический состав грунтов не оказывает никакого влияния. В качестве источников гамма-излучения используются Co, Cs и Ra активностью 0,5—2 *мг·экв* радия, помещаемые в специальные ампулы.

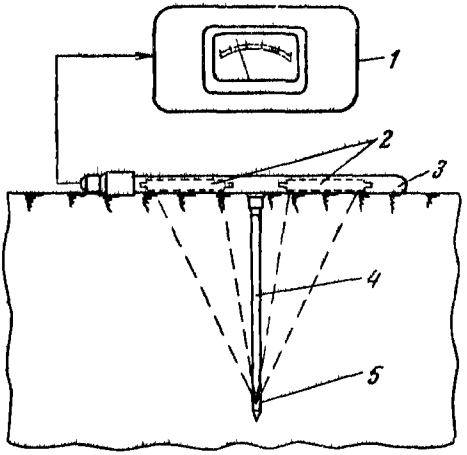


Рис. 73. Гамма-плотномер «Грунт» ГП-1
1 — пульт управления; *2* — газоразрядные счетчики; *3* — трубчатый корпус; *4* — вертикальный стержень; *5* — гамма-излучатель

В настоящее время в употреблении имеются гамма-плотномеры различных конструкций. На рис. 73 показана схема действия гамма-плотномера «Грунт» ГП-1, рекомендуемого при инженерно-геологических исследованиях в дорожном и гидротехническом строительстве, при производстве строительных работ нулевого цикла и других. Гамма-излучателем является Co, счетчиком — микроамперметр. Толщина исследуемой среды 25 *см*, что позволяет определять плотность грунта в объеме до 1600 $см^3$. Прибор ГП-1 обслуживается одним техником-оператором.

Для определения естественной влажности грунтов используется нейтронное излучение. Нейтроны при излучении, обладающие высокой кинетической энергией, не имея заряда, свободно проникают через электронную оболочку атома и сталкиваются с его ядром. Передавая ядру часть своей кинетической энергии, нейтроны постепенно теряют свою скорость и в конце процесса она становится равной скорости теплового движения, которое присуще атомам всех элементов. Замедленные нейтроны поэтому называются т е п л о в ы м и.

Доля энергии, теряемой нейтроном при соударении с ядром атома, зависит от соотношения масс ядра и нейтрона. Если масса ядра намного превышает массу нейтрона, доля теряемой нейтроном энергии при соударении невелика и последний превращается в тепловой лишь в результате большого числа соударений. Если же массы ядра и нейтрона примерно равны, то нейтрон при соударении теряет в среднем половину своей энергии, и превращение ее в тепловую происходит очень быстро. Грунты состоят из минералов, в состав которых входят элементы, масса ядер их во много раз превосходит массу нейтрона. Только масса ядра водорода примерно равна массе нейтрона (соответственно 1,00797 и 1,00891). Поэтому замедляющая способность воды, всегда имеющейся в грунтах, в сотни раз превосходит замедляющую способность других элементов, входящих в состав грунтов. В свою очередь замедление быстрых нейтронов происходит тем интенсивнее, чем выше влажность исследуемого грунта. Результаты определения влажности грунтов нейтронным методом не зависят от температуры и степени минерализации воды, от фазового состояния воды (жидкая, твердая — лед, парообразная), от минерального, гранулометрического и химического состава грунтов.

Для определения естественной влажности грунтов сконструированы приборы в виде гильз, в которых монтируются источники быстрых нейтронов (смесь полония с бериллием или радия с бериллием) и счетчик медленных (тепловых) нейтронов. Гильзу с датчиком и счетчиком помещают в стальную трубку, которую плотно вдавливают в исследуемый грунт. Модификацией радиоактивного влагомера является алюминиевая трубка, в которой находится источник быстрых нейтронов без счетчика. Перед погружением трубки в грунт в нее помещают тонкую индиевую пластинку. Индий свободно пропускает быстрые нейтроны, не изменяясь при этом. Но при облучении индия медленными нейтронами, поступающими в трубку из грунта, после пробега в нем в каком-либо объеме ядро индия легко захватывает медленные нейтроны, приобретая так называемую наведенную радиоактивность. Чем больше влажность грунта, тем большую наведенную радиоактивность приобретает пластинка индия. После получасового погружения в грунт влагомер извлекают из скважины, из него вынимают пластинку индия и точным счетчиком определяют ее радиоактивность, а по степени радиоактивности, используя специальные графики, определяют содержание в грунте влаги в процентах.

В настоящее время сконструированы приборы — влагоплотномеры, дающие возможность одновременно определять плотность и влажность грунтов в любой заданной точке по глубине скважины [6, 21, 36, 42].

Стационарные наблюдения. Надобность в подобных наблюдениях возникает в тех случаях, когда динамика, режим, характер и интенсивность проявления неблагоприятных физико-геологических процессов не могут быть изучены в процессе ведения съемочных и опытно-исследовательских работ с полнотой,

позволяющей запроектировать эффективные защитные мероприятия.

Все стационарные наблюдения выполняются по специально разработанной программе, составляемой в соответствии с требованиями действующих инструктивных указаний. Наблюдения могут продолжаться в течение от одного года до двух-трех лет и больше. В особо неблагоприятных районах (оползневых, лавиноопасных, проявления селей, карстовых явлений и т. п.) для систематического изучения физико-геологических процессов организуются инженерно-геологические станции (общегосударственные или ведомственные).

Лабораторные работы. Для лабораторного определения физико-механических свойств грунтов (удельного и объемного весов, влажности, пластичности сопротивления сжатию, сдвигу и др.) требуются образцы с нарушенной и ненарушенной структурой. Отбор образцов с нарушенной структурой никаких трудностей не вызывает. Поскольку на образцах нарушенной структуры определяется ряд показателей свойств грунтов (гранулометрический и минеральный состав, удельный вес, пластичность и др.), то объем отбираемых образцов грунтов по ГОСТ 12071—66 должен быть не менее: *скальных* и *крупнообломочных* 2000 $см^3$, песчаных 1000 $см^3$, глинистых 500 $см^3$.

Для определения объемного веса образец грунта с ненарушенной структурой в соответствии с ГОСТ 5182—64 отбирается методом режущего кольца — с помощью металлических колец диаметром не менее 80 *мм* и высотой не более двух диаметров, толщина стенок 2 *мм* с острыми краями.

Для определения естественной влажности образец грунта нарушенной структуры отбирается в чистый стеклянный или металлический стаканчик — бюкс, предварительно взвешенный. Бюкс полностью заполняется грунтом, плотно закрывается притертой крышкой и парафинируется по краю крышки, после чего отправляется в лабораторию.

Для определения показателей, характеризующих деформационные и прочностные свойства грунтов (сопротивление сжатию и сдвигу), отбираются образцы с ненарушенной структурой — монолиты в соответствии с требованиями ГОСТ 12071—66.

Образцы грунта ненарушенного сложения из буровых скважин отбирают с уровня зачищенного забоя грунтоносами (конструкции их различные), обеспечивающими ненарушенное сложение и сохранение природной влажности образцов грунта.

Количество образцов грунта нарушенного или ненарушенного сложения, отбираемых с одной и той же отметки из одного и того же однородного по номенклатурному виду и генезису слоя грунта, устанавливается заданием на изыскания. Порядок упаковки образцов для транспортировки и сроки хранения до начала лабораторных исследований указаны в ГОСТ 12071—66.

§ 71. Виды и объемы инженерно-геологических исследований для различных видов строительства

Как уже отмечалось, виды, объем и характер инженерно-геологических исследований зависят от природных факторов и вида строительства. Применительно к различным видам строительства разработаны ведомственные методические указания и инструкции, которыми и следует руководствоваться при инженерно-геологических исследованиях. Ниже приводятся основные положения об объемах, видах и характере инженерно-геологических исследований при строительстве различных сооружений.

Строительство гражданских и промышленных сооружений. Инженерно-геологические исследования для этого вида строительства проводятся только в две стадии: проектного задания и рабочего проектирования. В состав исследовательских работ входят: инженерно-геологическая съемка территории, проходка шурфов и бурение скважин, гидрогеологические исследования, полевые и лабораторные исследования грунтов.

Инженерно-геологическая съемка является комплексной и проводится в масштабах 1 : 5000—1 : 25 000, а в сложных геологических условиях — 1 : 1000—1 : 5000. В состав съемки входят: изучение форм рельефа (долин рек, оврагов, балок, водоразделов) и условий стока атмосферных осадков; изучение физико-геологических явлений (оползней, обвалов, сплывов, карста, провалов, просадочных блюдец, эрозионных и других явлений); изучение геологического строения района строительства по естественным и искусственным обнажениям; описание и картирование выходов подземных вод, заболоченности, глубины залегания и колебания уровней; обследование состояния существующих зданий с подробным описанием обнаруженных деформаций сооружений.

Проходка шурфов и бурение скважин должны обеспечить выявление геологического строения и литологического состава грунтов, глубины залегания грунтовых вод, мощности и состава водоносных горизонтов. Бурение проводится комплектами диаметром не менее 89 *мм*.

На стадии проектного задания количество выработок назначается в зависимости от сложности инженерно-геологического строения местности и колеблется от 5 (простые условия) до 15 выработок на 1 *км* створа. Створы закладываются вдоль и поперек к основным геоморфологическим элементам и их должно быть не менее двух. Глубина выработок изменяется в пределах 10—30 *м* и назначается на месте. Из общего количества выработок 1/5 проходится в виде шурфов или скважин диаметром не менее 127 *мм*; шурфы проходятся до уровня подземных вод, а ниже бурится скважина указанного диаметра. Эти выработки называются техническими и предназначаются для отбора монолитов, которые отбираются из каждой литологической разности проходимых пород.

В случае, когда зеркало грунтовых вод находится выше глубины заложения фундаментов, из двух-трех специально оборудованных скважин проводятся опытные откачки и отбираются пробы воды для химического анализа.

На стадии рабочего проектирования шурфы и скважины проходятся в пределах расположения каждого здания и сооружения и размещаются по контуру сооружений. Расстояния между выработками назначаются исходя из сложности геолого-литологического строения и колеблются в пределах 100 (простое сложение) — 25 *м* и менее при частой смене грунтов по вертикали и в горизонтальном направлении. Глубина выработок определяется в зависимости от мощности сжимаемой толщи грунтов в основании, что в свою очередь зависит от типа фундамента (ленточный или прямоугольный) и общей величины нагрузки на фундамент и определяется на месте. Минимальная глубина выработок должна быть не менее 6 *м*. Количество технических выработок назначается в зависимости от сложности геологического строения площадки и чувствительности конструкции здания к неравномерным осадкам и должно быть не менее трех для отдельных сооружений. Отбор монолитов из технических выработок проводится (начиная с отметки заложения подошвы фундаментов и на 2—3 *м* глубже активной зоны) для каждой литологической разности, но не реже чем через 1 *м* по глубине. Для пласта однородного грунта большой мощности (свыше 3 *м*) допускается отбор трех монолитов (из кровли, середины и подошвы пласта).

Полевые исследования механических свойств грунтов проводятся статической нагрузкой, лопастными установками и пенетрометрами, которые выполняются в пределах расположения наиболее ответственных сооружений по специальному указанию проектирующей организации. Испытанию подвергается каждая литологическая разность грунтов в пределах сжимаемой толщи.

Лабораторные исследования грунтов проводятся в целях расчленения толщи пройденных грунтов по классификации СНиП II-Б. 1-62 и для получения исходных данных, используемых при расчетах фундаментов и оснований сооружений.

Лабораторные исследования физико-механических свойств грунтов осуществляются по методике и с соблюдением условий, предусмотренных ГОСТ, что подробно излагается в руководствах по исследованию физико-механических свойств грунтов [53].

На основании материалов всех исследований составляется инженерно-геологический отчет по форме, принятой в геологоразведочных организациях. В отчете особенно детально описываются: геологическое строение и гидрогеологические условия площадки; физико-механические свойства грунтов площадки; выводы и рекомендации по улучшению свойств грунтов в случае, если их природные свойства не отвечают требованиям строительства по обеспечению устойчивости зданий и сооружений.

Подробно методика инженерно-геологических исследований для целей гражданского и промышленного строительства изложена

в многочисленной специальной литературе [6, 12, 21, 33, 44, 48].

Строительство карьеров. Современная техника позволяет вести горные работы открытым способом на глубинах 100—200 *м* и более.

При ведении работ открытым способом в настоящее время применяют очень сложные, тяжелые высокопроизводительные землеройные и транспортирующие механизмы: шагающие, многоковшовые и роторные экскаваторы, транспортно-отвальные мосты и пр. Применение сложной техники в карьерах требует проведения специальных дополнительных исследований на участках, где возможна разработка полезных ископаемых открытым способом.

При ведении работ открытым способом на значительных глубинах первостепенное значение приобретает вопрос устойчивости бортов карьеров. Неправильный выбор угла рабочего откоса β или высоты рабочего уступа h в сторону их завышения влечет за собой деформации последних (обвалы, оползневые процессы), занижение угла откоса уступов создает неудобства для работы землеройных машин.

Устойчивость бортов карьеров зависит от многих факторов, действующих в совокупности и взаимосвязи [18, 20, 34, 35, 41].

Знание геологических и гидрогеологических особенностей конкретных месторождений и физико-механических свойств пород вскрыши позволяет предвидеть влияние природных и искусственных факторов и заранее предпринимать соответствующие профилактические мероприятия, предотвращающие возможность проявления тех или других деформаций рабочих уступов.

Инженерно-геологические исследования проводятся совместно с геологоразведочными работами на стадии детальной разведки. На разных стадиях разведки месторождения характеристика инженерно-геологических условий дается по имеющимся материалам и по аналогии с действующими карьерами.

Для изучения гидрогеологических и инженерно-геологических условий участков, где разработка возможна открытым способом, на стадии детальной разведки при общей площади разведываемого участка свыше 10 $км^2$ закладываются одиночные опытные гидрогеологические и наблюдательные скважины из расчета по одной скважине на 2—3 $км^2$ разведываемой площади на каждый водоносный горизонт; при меньшей площади участка число таких скважин должно быть не менее двух на каждый водоносный горизонт. Скважины следует закладывать равномерно по всей разведываемой площади, но с непременным учетом гипсометрии водоупорного ложа и степени водопроницаемости водоносных горизонтов. Где отметки ложа наименьшие, а также где по геологическим предпосылкам водопроницаемость их будет большей, там и следует закладывать скважины.

Гидрогеологические и наблюдательные скважины служат также и для инженерно-геологического изучения исследуемой площади,

для чего в них отбираются монолиты и образцы с нарушенной структурой из всех проходимых пород. Отбираются также пробы воды перед началом откачки и в конце ее при третьем понижении для определения физических свойств и химического состава подземных вод.

Опытные откачки производятся из одиночных опытных гидрогеологических скважин по действующим инструкциям и методическим указаниям.

Инженерно-геологическая характеристика площади детальной разведки дается по показателям физико-механических свойств пород, определяемых в лаборатории на монолитах и образцах с нарушенной структурой и по результатам полевых опытно-исследовательских работ. Для определения физико-механических свойств пород в гидрогеологических скважинах на подрудный (или подугольный) водоносный горизонт из всех литологических разностей связных пород грунтоносом отбираются монолиты, а из несвязных пород — образцы с нарушенной структурой; монолиты отбираются диаметром не менее 100 *мм* и высотой 100—150 *мм*.

Помимо монолитов и образцов с нарушенной структурой, отбираемых из гидрогеологических скважин, образцы с нарушенной структурой отбираются также из разведочных скважин через каждые 2 *м* проходки по обводненным пескам; вес каждого образца около 1 *кг*. Образцы песков отбираются примерно из 10% от общего числа разведочных скважин равномерно со всей разведуемой площади; в лабораторных условиях на образцах определяются гранулометрический состав и коэффициенты фильтрации.

Данные, полученные при проведении детальной разведки, являются основными для проектирования карьера на стадии проектного задания. Используя результаты детальной разведки, проектная организация намечает расположение выездной и разрезной траншей, устанавливает (на основе соответствующих расчетов) углы рабочих откосов и их высоту, определяет наивыгоднейший угол всего рабочего борта карьера, обосновывает виды и объем дренажных мероприятий, а также решает все другие вопросы, связанные со строительством карьера и зависящие от геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических особенностей месторождения.

Когда определится местоположение выездной и разрезной траншей, дренажных шахт и направление дренажных штреков, приступают к следующей стадии разведочных работ — *доразведке*, проводимой на площадях разрезной траншеи и первых трех лет работы карьера. Основными задачами доразведки являются: уточнение геологического строения в пределах доразведуемой площади, гидрогеологических и инженерно-геологических условий строительства выездной и особенно разрезной траншеи, геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических данных по направлениям осей дренажных штреков, что необходимо для устройства водосборников, камер для установки насосов, выбора мест для устройства трубчатых водопонижающих колодцев и т. п.

Данные доразведки используются проектной организацией для составления рабочего проекта строительства карьера.

При доразведке бурятся специальные инженерно-геологические скважины. Глубина инженерно-геологических скважин на площади выездной траншеи устанавливается с расчетом, чтобы забой скважины был на 10 *м* ниже основания траншеи (с учетом уклона последней), на остальной площади — на 10 *м* ниже почвы полезного ископаемого.

Опытные гидрогеологические скважины, как правило, кустовые на каждый водоносный горизонт, закладываются в местах строительства дренажных шахт и вентиляционных шурфов. В скважинах, проходимых на подрудный водоносный горизонт, отбираются монолиты и образцы с нарушенной структурой (из песчаных разностей). Подробно методика инженерно-геологических расследований для обоснования строительства горных предприятий изложена в специальных руководствах [33, 34, 35, 41, 44].

Строительство гидротехнических сооружений. При строительстве гидротехнических сооружений (имеются в виду гидроэнергетические узлы, наиболее ответственной частью которых являются плотины) к инженерно-геологическим исследованиям предъявляются наиболее сложные и ответственные требования. Инженерно-геологические исследования при строительстве гидроэнергетических узлов весьма сложны и обычно включают в себя все виды работ, применяемых при инженерно-геологических исследованиях.

Инженерно-геологические исследования на стадии обоснования схемы комплексного использования реки (ТЭД) включают комплексную съемку, геофизические, буровые и горные работы, опытно-фильтрационные исследования, поиски и разведку строительных материалов. Масштабы инженерно-геологической съемки устанавливаются в зависимости от категории сложности инженерно-геологических условий и характера гидроузла; вся долина реки картируется в масштабах 1 : 500 000—1 : 50 000, а участки предполагаемого размещения гидроузлов — в масштабах 1 : 50 000—1 : 5000. Геофизические, буровые и горные работы дополняют и уточняют данные инженерно-геологической съемки. Опытно-фильтрационные исследования проводят на участках размещения гидроузлов. Поиски и разведка строительных материалов предназначены для обеспечения проектируемых гидроузлов естественными строительными материалами.

Работы на стадии проектного задания, учитывая инженерно-геологические условия, имеют целью выбор типов сооружений, разработку основных компоновочных и конструктивных решений, выбор наиболее целесообразной организации строительства и технологии строительных работ, определение стоимости проектируемых сооружений. Изыскания проводятся в два этапа: на конкурирующих участках и на окончательно выбранном участке сооружения гидроузла. Инженерно-геологические исследования включают все виды

работ. Инженерно-геологическая съемка в зависимости от сложности природных условий и этапа работ проводится в масштабах 1 : 25 000—1 : 2000.

Разведочные работы ведут по осям сооружений и дополнительным параллельным осям, расположенным на расстоянии около 100 м от основной оси. Гидрогеологические опытно-фильтрационные исследования (откачки, нагнетания, наливы и др.) проводятся в объемах, обеспечивающих выполнение всех гидрогеологических расчетов (водопритоки в котлованы, определение фильтрационных потерь, расчет гидродинамического давления, величины суффозии и др.). Изучается химический состав подземных вод и особенно их агрессивность по отношению к бетону. Исследования физико-механических свойств пород проводятся для каждого из выделенных слоев; количество определений для каждого показателя на первом этапе исследований изменяется от 5 до 20 и на втором — от 20 до 50. Свойства скальных пород оценивают с учетом их трещиноватости, выветрелости, тектонической нарушенности и т. п. Для оценки естественного состояния песчаных и глинистых пород проводят пробные нагрузки, зондирование, вращательный срез, применяют *прессиометрию, радиоактивные изотопы и др.*

Инженерно-геологические исследования в нужном объеме проводят также на участках деривационных каналов и каналов судоходных сооружений, на трассах деривационных туннелей и по чаше водохранилища; в последнем случае исследования проводятся для прогнозирования возможной фильтрации из водохранилища, подтопления прилежащей территории, переработки берегов и для обоснования проектов защитных мероприятий.

Инженерно-геологические исследования на стадии рабочих чертежей имеют целью доработку и уточнение всех инженерно-геологических условий для окончательного решения всех технических вопросов, возникающих в процессе проектирования и строительства конкретных сооружений (бетонных плотин, зданий гидроэлектростанций, шлюзов и др.). Виды работ те же, но разведочные выработки, опытно-исследовательские работы, моделирование и прочие исследования проводятся в пределах контуров определенных сооружений.

В период строительства инженерно-геологические исследования сводятся к инженерно-геологической документации вскрываемых котлованов и выемок, контролю за ходом строительства, наблюдению за осадкой и сдвигом сооружений, за работой противофильтрационных завес, за ходом переработки берегов водохранилищ. Результаты этих наблюдений позволяют проверить правильность принятых в проектах решений и в случае необходимости внести соответствующие коррективы.

Виды, объемы и методика инженерно-геологических исследований, проводимых для обоснования строительства гидротехнических сооружений, изложены в «Инструкции по составу и объему изысканий для гидроэнергетического строительства» и в другой специальной литературе [33, 44, 45].

Дорожное строительство. Инженерно-геологические исследования при изысканиях железных и автомобильных дорог проводятся с целью получения исходных данных для проектирования земляного полотна, искусственных сооружений, устройств электрификации и связи, станционных узлов, рабочих поселков, промышленных сооружений, водоснабжения и канализации, карьеров ископаемых строительных материалов. Эти данные необходимы для выбора оптимального положения на местности трассы земляного полотна и других сооружений и их целесообразных конструкций.

Инженерно-геологические исследования выполняются в соответствии с заранее разработанной программой, составленной на основе технического задания, выдаваемого главным инженером проекта, и утверждаемой руководством проектно-изыскательской организации. Программу работ составляют в соответствии со стадией проектирования и в увязке с частными техническими заданиями на выполнение исследований по разделам проекта (земляного полотна, искусственных сооружений, станций и узлов, электрификации, водоснабжения и др.).

Программа исследований уточняется, корректируется и дополняется в процессе ее выполнения. Необходимость подобной корректировки программы возникает: при появлении новых вариантов трассы; при выявившихся несоответствиях природных условий на отдельных участках трассы предполагавшимся, что невозможно было учесть по имевшимся материалам, положенным в основу составления программы; при изменении принципиальных положений по размещению и конструкциям проектируемых сооружений; при появлении новых объектов проектирования.

На стадии *технико-экономического обоснования* (ТЭО) полевые инженерно-геологические работы, как правило, не проводятся. Геологи привлекаются к работе по сбору, систематизации и обобщению имеющихся архивных и опубликованных материалов по району предстоящих исследований и к камеральной обработке по инженерно-геологическому дешифрированию аэрофотоснимков.

На стадии *проектного задания* исследования выполняются в два этапа: для выбора варианта трассы; по окончательно установленному варианту трассы.

На первом этапе в задачу исследований входит обоснование выбора варианта трассы по территории с наиболее благоприятными инженерно-геологическими условиями и в то же время конкурентноспособными по строительной стоимости, эксплуатационным расходам и другим показателям. Основные виды исследований для выбора варианта трассы: аэрофотосъемка, маршрутные и площадные инженерно-геологические съемки в масштабе 1 : 25 000 в полосе шириной 0,3—0,5 *км*, а на равнинной местности при простых инженерно-геологических условиях в масштабе 1 : 50 000. Разведочные, геофизические, опытно-исследовательские работы проводят только на отдельных участках (в местах индивидуального проектирования, размещения ответственных сооружений — мостов, туннелей).

По полученным данным дается инженерно-геологическая оценка конкурирующих вариантов трассы и окончательно устанавливается оптимально благоприятная трасса дороги.

По выбранной трассе в полосе шириной 300 *м* ведутся инженерно-геологическая съемка в масштабе 1 : 10 000, поиски и разведка месторождений строительных материалов. На отдельных участках с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями ширину полосы съемки увеличивают до 0,5—1 *км* и более в целях детального уяснения степени опасности имеющихся физико-геологических явлений для проектируемых объектов.

Разведочные, геофизические и опытно-исследовательские работы выполняют в местах размещения конкретных проектируемых сооружений: насыпей, выемок, водоотводов, дренажей, резервов, земляных карьеров и др. На объем разведочных работ и их содержание влияют многие факторы: геоморфология, сложность геологических и гидрогеологических условий, род и размеры проектируемых сооружений и др.

Инженерно-геологические исследования на стадии *рабочего проектирования* осуществляются в дополнение к исследованиям, проведенным на предшествующей стадии, и приурочиваются к конкретным местам проектируемого расположения земляного полотна, искусственных сооружений, станционных и производственных сооружений, мостовых устоев, опор линий электропередач и других железнодорожных устройств. Для составления рабочих чертежей проводятся исследования всех видов, но значительно ограничивается роль инженерно-геологической съемки и возрастает объем лабораторных и полевых опытно-исследовательских работ. На этой стадии выполняются большинство опытных откачек, пробных нагрузок в шурфах и скважинах, испытаний грунтов динамическим и статическим зондированием, лопастными установками. На этой стадии продолжаются стационарные наблюдения за режимом подземных вод, динамикой оползневых и других физико-геологических явлений, деформациями сооружений, эффективностью укрепительных сооружений, мерзлотными процессами и другие, начатые при изысканиях на стадии проектного задания.

Детально виды и содержание инженерно-геологических исследований для дорожного строительства излагаются в многочисленной специальной литературе [44 и др.].

§ 72. Особенности инженерно-геологических исследований в области развития многолетнемерзлых пород

Инженерно-геологические исследования в районах распространения многолетнемерзлых пород имеют ряд специфических особенностей. Дополнительно к общепринятым видам исследований проводятся: мерзлотная съемка, в процессе которой выявляются закономерности распространения многолетнемерзлых пород, изучаются

мерзлотные физико-геологические явления — термокарст, наледи, бугры пучения, солифлюкция и др.; замеры температур во всех разведочных и в специальных режимных скважинах; стационарные наблюдения в режимных скважинах продолжаются до конца строительства, а нередко и в течение более продолжительного срока; специальные лабораторные и полевые исследования физико-механических свойств мерзлых пород; исследования водопроницаемости мерзлых пород; водопроницаемость рыхлых отложений изучается в основном лабораторными методами [53], а скальных — геофизическими (электроразведка, сейсморазведка, гамма-гамма-каротаж и др.) и методом нагнетания воздуха в скважины.

Методика инженерно-геологических исследований для проектирования и строительства различных объектов в районах распространения многолетнемерзлых пород изложена в специальной литературе [20, 29, 44, 45 и др.].

ГЛАВА XVIII

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ В СКВАЖИНАХ И ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

§ 73. Гидрогеологические исследования при бурении скважин

При организации и проведении разведочных работ на месторождениях полезных ископаемых, при поисках и разведке подземных вод для целей водоснабжения, при инженерно-геологических исследованиях и в других случаях, когда необходимо изучение подземных вод, наиболее точные данные о гидрогеологических условиях изучаемой территории получаются при проходке скважин и других горных выработок. В процессе проходки выработок ведутся соответствующие гидрогеологические наблюдения, которые дают возможность детально изучить условия залегания, состав, мощность, режим, взаимосвязь водоносных горизонтов и опробовать их.

Бурение гидрогеологических скважин чаще всего ведется ударно-канатным и роторным способами, реже колонковым.

Ударно-канатный способ бурения гидрогеологических скважин обеспечивает получение наиболее достоверных данных о водных свойствах проходимых пород и качественно опробовать все водоносные горизонты. Этим способом бурят скважины глубиной до 300 *м* и более.

Роторный способ бурения применим для бурения скважин любых глубины и диаметра. Однако применение глинистой промывки обусловливает глинизацию (кольматацию) водоносных

пород в призабойной зоне скважины, снижается проницаемость этой зоны и резко падает производительность скважин. Дебит скважин, пробуренных роторным способом, всегда значительно ниже, чем скважин ударного бурения.

К о л о н к о в ы й с п о с о б бурения гидрогеологических скважин применяется в крепких (скальных) и глинистых породах и обеспечивает получение вполне надежных данных. Основными недостатками колонкового бурения являются необходимость применения глинистой промывки и малый диаметр скважин, что препятствует использованию современных высокопроизводительных насосов, для установки которых необходимы скважины диаметром более 200 *мм*.

В последнее время для бурения неглубоких скважин (до 50—60 *м*) с успехом стали применять ш н е к о в ы й с п о с о б проходки и в и б р о б у р е н и е, а также бурение с «обратной» промывкой водой, резко повышающие производительность буровых на воду скважин по сравнению с другими способами бурения.

Глубина гидрогеологических скважин изменяется в широких пределах (от десятков метров до 1000 *м* и более), однако большинство (около 80%) их имеет глубину до 100—150 *м*, причем скважины глубиной до 100 *м* составляют около 60%. Основные диаметры скважин 200—250 *мм* (данные Н. И. Куличихина).

Способы проходки эксплуатационных и разведочно-эксплуатационных скважин на воду должны быть технически целесообразными и увязаны с гидрогеологическими особенностями местности, они устанавливаются в соответствии с существующими нормативными руководствами [11, 47, 49] и подробно излагаются в специальной литературе [19, 43, 45].

Для освещения гидрогеологических условий разведуемой территории и получения количественных гидрогеологических характеристик при бурении скважин любым способом проводятся следующие наблюдения и опытно-исследовательские работы: замеры уровней воды; наблюдения за поглощением промывочной жидкости; наблюдения за самоизливом воды; определения температуры воды; замеры выхода газа; наблюдения за провалами бурового инструмента при бурении; наблюдения за выходом керна и его макроскопическое изучение; пробные, опытные и пробно-эксплуатационные откачки; отбор проб воды, газа и образцов пород для анализа и лабораторных исследований.

Уровень воды в скважинах измеряется при помощи разнообразных приборов — гидрогеологических рулеток конструкции Е. В. Симонова и Б. П. Остроумова, электроуровнемеров, пневматических уровнемеров, лимниграфов и других, подробное описание которых, а также методика работы приводятся в специальных руководствах и инструкциях [19, 43, 45].

При вскрытии водоносных горизонтов с фонтанирующей (самоизливающейся) водой статический уровень измеряют путем наращивания обсадных труб выше поверхности земли, пока самоизлив не прекратится (рис. 74).

Наблюдения за поглощением промывочной жидкости. Данные о поглощении промывочной жидкости породами, вскрываемыми при проходке скважин, имеют важное значение. Они позволяют охарактеризовать водопроницаемость пород в отдельных интервалах скважины. Существует несколько способов учета потерь промывочной жидкости.

Чаще всего применяется способ тщательного измерения количества жидкости в приямке и отстойнике в начале и в конце смены с учетом добавленной за это время жидкости. При применении этого способа необходимо, чтобы просачивание воды в породу было исключено, что достигается устройством приямка и отстойника из водонепроницаемых материалов либо глинизацией, цементацией и гудронированием их стенок. Форма приямка и отстойника должна быть такой, чтобы в любое время можно было быстро определить объем находящейся в них жидкости.

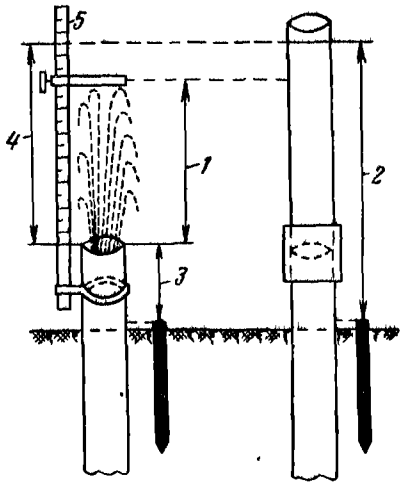


Рис. 74. Измерение высоты фонтанирования, статического и динамического уровней при самоизливе

1 — высота фонтана; *2* — высота статического уровня; *3* — высота динамического уровня, *4* — понижение, *5* — рейка

Замеры температуры воды. Температуру воды в неглубоких скважинах (до 100 *м*) измеряют при помощи родникового термометра. Термометр опускают в скважину на прочном провощенном шнуре или металлическом тросике, выдерживают в воде в течение 30 *мин*, после чего быстро извлекают. Сначала определяют доли, а затем уже целые градусы.

Для замера температуры воды в очень глубоких скважинах применяют специальные глубинные термометры, рассчитанные на большие давления. Опускают эти термометры на стальном тросе при помощи лебедки и треноги. Глубинные термометры изготавливаются для различных глубин. Замеряют температуру в глубоких скважинах также при помощи электротермометров, биметаллических термометров и др.

Выход газа из скважины. Газ может выделяться в виде пузырьков или газо-водяной смеси, выбрасываемой из скважины. При появлении газа надо быть крайне осторожным с огнем во избежание пожара или взрыва, если выделяющийся газ является легковоспламеняющимся. При опробовании газоносности подземных вод в скважинах необходимо определить состав свободно выделяющегося и растворенного газа, а также фазовое состояние газа на глубине залегания пласта, что в свою очередь требует определения объемного соотношения газ — вода. Пробы свободно выделяющегося

и растворенного газа отбираются методом вытеснения воды газом, для чего употребляется бутыль, заполненная водой, в которую газ поступает через шланг, вмонтированный в пробку, закрывающую бутыль. Для выхода воды, вытесняемой газом, в пробку вставлена трубка.

При наличии газо-водяной эмульсии для отделения газа от воды употребляются газоотделители различной конструкции и объема, который изменяется в зависимости от дебита скважины (рис. 75).

Провалы бурового инструмента. При бурении в закарстованных породах (известняках, доломитах, гипсах и т. п.)

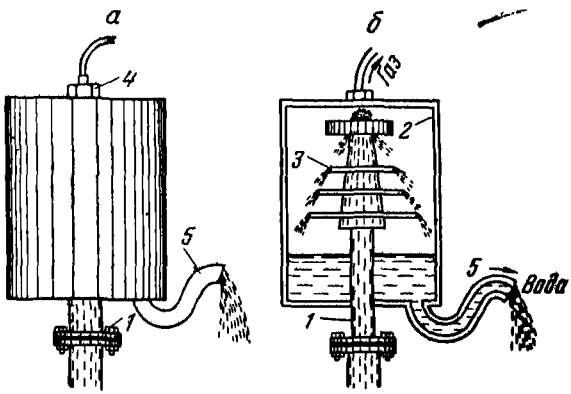


Рис. 75. Внешний (*а*) и внутренний (*б*) вид газоотделителя

1 — приемная труба для газо-водяной эмульсии; *2* — сетчатая коробка; *3* — желевные пластины, способствующие выделению газа при рассеивании воды; *4* — трубка для выхода газа; *5* — водоотводная труба

довольно часто наблюдаются провалы бурового инструмента, что свидетельствует о наличии в породах крупных пустот. Каждый случай провала инструмента нужно отмечать (от какой и до какой глубины инструмент прошел по карстовой пустоте).

Выход керна и его изучение. По выходу керна можно ориентировочно судить о водопроницаемости проходимых при бурении пород. Трещиноватые породы, дающие малый выход керна, обычно более водоносны. Сопоставление процента выхода керна с результатами наблюдений за уровнем воды и потерями промывочной жидкости дает возможность ориентировочно оценить водоносность различных интервалов пород. На основе этих данных устанавливаются интервалы для проведения более детальных гидрогеологических работ, дающих точные количественные характеристики степени водопроницаемости пластов, используемых затем при всевозможных гидрогеологических расчетах.

Существенное значение имеет изучение керна и для инженерно-геологической оценки пород. При визуальном описании определяются состав, структура, текстура, трещиноватость, признаки выветривания, наличие включений. Непосредственно в поле определяются некоторые физико-механические свойства пород на большом числе образцов, что позволяет затем, пользуясь методами математической статистики, определять обобщенные и расчетные показатели свойств

грунтов. Для применения полевых методов исследования свойств грунтов необходимо иметь простейшее оборудование и приборы, в том числе полевую инженерно-геологическую лабораторию.

Отбираются также образцы пород из керна для лабораторных исследований. Порядок отбора образцов для этих целей определяется с учетом способа разработки (открытого или подземного) месторождения полезного ископаемого и характера проходимых пород, что и указывается в проекте работ.

Наблюдения в действующих или строящихся шахтах и карьерах, расположенных поблизости, имеют весьма существенное значение и в совокупности с данными разведочных работ позволяют более точно охарактеризовать гидрогеологические особенности разведуемого месторождения, особенно при прогнозировании величин будущего водопритока в выработки и поведения пород под сооружениями и в горных выработках.

§ 74. Оборудование скважин для опытно-исследовательских работ

Как уже указывалось, наиболее достоверные гидрогеологические параметры изучаемых водоносных пород получаются при проведении полевых опытно-исследовательских работ — откачек. В этих случаях гидрогеологические скважины должны быть соответствующим образом подготовлены: опробуемые водоносные горизонты тщательно изолированы один от другого, скважины оборудованы фильтрами, подготовлены насосы и аппаратура для измерения расходов и уровней, для взятия проб воды и образцов пород, для производства полевых химических анализов и т. п.

Перед откачкой скважины оборудуют фильтрами. Тип фильтра выбирают с учетом литологического состава водосодержащих пород, но более простой конструкции, учитывая непродолжительность работы скважины. В галечниках и неустойчивых трещиноватых породах применяют фильтры в виде перфорированной металлической трубы с круглыми или щелевыми отверстиями.

При откачке из водоносных песков применяются сетчатые фильтры (рис. 76), в которых рабочая часть состоит из перфорированной трубы с отверстиями диаметром 5—10 *мм*, проволочной спирали *2* и сетки *3* галунного, киперного или квадратного плетения. Сетка подбирается с таким расчетом, чтобы 40—60% песчаной породы проходило через ее отверстия. В мелкозернистых глинистых песках для увеличения захватной способности устраиваются гравийные фильтры (рис. 77). Диаметр зерен обсыпки гравийного фильтра берется больше среднего диаметра водоносного песка в 8—12 раз. При разведочных работах гравийные фильтры часто устраивают на поверхности земли и в собранном виде опускают в скважину (рис. 78).

Существуют фильтры и иных видов — проволочные, каркасно-стержневые, блочные, корзинчатые и другие, подробно описываемые в специальных руководствах [9, 19, 26, 43, 45, 47, 49].

После проведения откачек опытные гидрогеологические и наблюдательные скважины, если только они не будут включаться в стационарную сеть для организации наблюдений за режимом подземных вод или же использоваться как эксплуатационные, подлежат ликви-

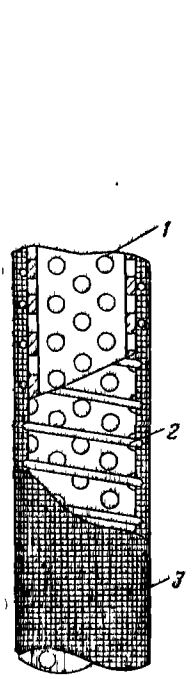


Рис. 76. Сетчатый фильтр

1 — перфорированная труба; *2* — проволочная спираль; *3* — сетка

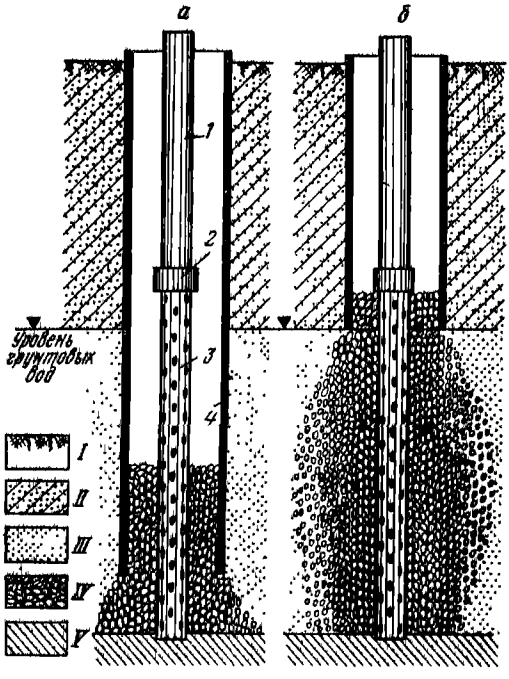


Рис. 77. Гравийный фильтр, устраиваемый в забое скважины

а — в начале засыпки; *б* — в конце засыпки; *1* — глухая часть трубы; *2* — соединительная муфта; *3* — перфорированная труба; *4* — обсадная труба;
I — растительный слой; *II* — супесь; *III* — водоносный мелкозернистый песок; *IV* — гравийная засыпка; *V* — водоупорные породы

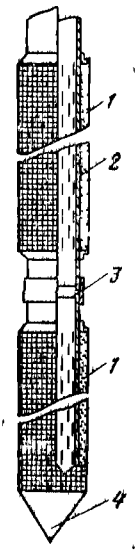


Рис. 78. Гравийный фильтр, изготавливаемый на поверхности

1 — сетка; *2* — гравийная обсыпка; *3* — муфта; *4* — башмак

дации. Насосы, фильтры и обсадные трубы извлекают, а скважины тампонируют. Тампонирование скважин осуществляется различными способами: путем заливки в них цементного или глинистого раствора, забрасывания глиняных шариков и т. п.

§ 75. Бесфильтровые скважины

При наличии в кровле водоносного горизонта, сложенного песками, мергеля, мела, песчаника или других плотных пород мощностью свыше 10 *м* возможно устройство бесфильтровых скважин

(рис. 79), в которые вода поступает через нижний открытый конец обсадных труб. Для предотвращения от обрушения кровли водоприемной воронки, что возможно с течением времени, рекомендуется воронку заполнить крупнозернистым песком или гравием. Диаметр зерен засыпки не должен превышать средний диаметр водоносного песка более чем в 8—12 раз.

Производительность бесфильтровых артезианских скважин в среднем в 2 раза больше, чем скважин, оборудованных сетчатыми фильтрами, а срок безотказного действия достигает многих десятков лет. Скважины же, оборудованные сетчатыми фильтрами и находившиеся в аналогичных условиях, за 15—20-летний срок работы практически становились безводными вследствие зарастания фильтров выпадающими из воды гидратами окислов железа, гидроокислами кальция и другими солями.

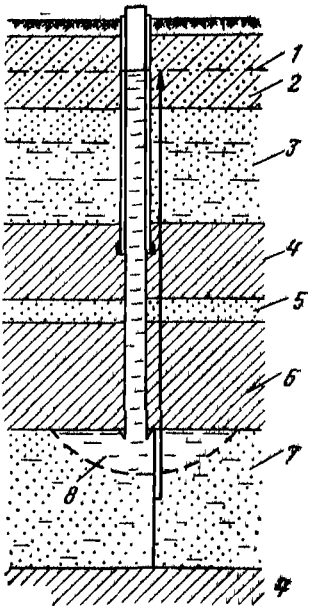


Рис. 79. Схема бесфильтровой скважины
1 — пьезометрический уровень; *2* — суглинок; *3* — песок тонкозернистый водоносный; *4* — глина; *5* — песок; *6* — глина плотная; *7* — песок мелкозернистый водоносный; *8* — воронка

ГЛАВА XIX

УСЛОВИЯ ОБВОДНЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

§ 76. Основные задачи изучения подземных вод при разработке месторождений

При разработке месторождений полезных ископаемых подземные воды, приуроченные к вмещающим полезное ископаемое породам, поступают в горные выработки. При оценке месторождений они имеют значение не только как фактор, обусловливающий притоки в горные выработки, но и как фактор, отрицательно влияющий на общие условия труда шахтеров (простуды, травмы), что снижает производительность труда и вызывает необходимость введения сокращенного рабочего дня и затрат на охрану труда.

В наше время средства борьбы с притоками подземных вод в горные выработки столь мощные, что горные работы можно вести на любой доступной глубине и в любых самых сложных гидрогеоло-

гических условиях. Раздел гидрогеологии, изучающий рудничные, или шахтные, воды, получил наименование р у д н и ч н о й, или ш а х т н о й, г и д р о г е о л о г и и. Задачами шахтной гидрогеологии являются: детальное изучение гидрогеологических условий разрабатываемых месторождений; гидрогеологическое обоснование строительства карьеров, проходки стволов шахт и прочих горных выработок (рудничных дворов, штреков, нарезных и очистных выработок); изучение режима водопритоков в шахты и карьеры и режима подземных вод на шахтном поле; изучение действия и эффективности водопонизительных установок и прочих дренажных мероприятий и внесение нужных изменений в их работу; изучение химического состава шахтных вод и разработка мер по борьбе с их агрессивностью; разработка теоретических основ для определения притоков в горные выработки; разработка наиболее рациональных способов борьбы с шахтными водами; решение вопросов подработки горными выработками поверхностных водотоков и водоемов.

Разработка способов активной борьбы с рудничными водами, теоретических основ и наиболее рациональных способов осушения месторождений полезных ископаемых при их разработке являются основными задачами рудничной (шахтной) гидрогеологии.

§ 77. Факторы, обусловливающие обводнение месторождений

Обводненность месторождений полезных ископаемых обусловливается целым рядом естественных и искусственных факторов.

К основным природным факторам обводнения относятся: атмосферные осадки; рельеф местности; просачивание воды из поверхностных водотоков и водоемов; обнаженность коренных пород и роль покровных отложений; литологический состав вмещающих пород; тектоника района; глубина горных выработок; формы погребенного рельефа. К искусственно созданным факторам можно отнести: влияние старых затопленных выработок; влияние незатампонированных разведочных скважин; принятую систему ведения горных работ.

А т м о с ф е р н ы е о с а д к и. Количество воды, поступающее в горные выработки при небольшой глубине залегания полезного ископаемого, находится в прямой зависимости от количества выпадающих атмосферных осадков и интенсивности снеготаяния. Например, на одной из шахт, где разрабатываются горючие сланцы, приток летом и зимой обычно не превышает 435 $м^3/ч$, а весной при снеготаянии увеличивается до 4620 $м^3/ч$, т. е. больше чем в 10 раз.

Р е л ь е ф м е с т н о с т и. Колебание притоков воды в горные выработки и степень водообильности зависят от высотного положения шахтного поля и изрезанности его овражно-балочной системой. В условиях Донбасса шахтные поля, приуроченные к водораздельным пространствам со слаборасчлененным рельефом, где обнажен

ность коренных пород ничтожная, средний коэффициент водообильности * шахт составляет 1,8—2,8.

Шахтные поля, приуроченные к склонам водоразделов, где широко развита овражно-балочная система и имеет место значительная обнаженность коренных пород, характеризуются средним коэффициентом водообильности 2,5—3,0.

Наиболее обводнены горные выработки, расположенные под речными долинами. Например, коэффициент водообильности шахты Сутаган, поле которой расположено по долине реки, равен 30 при среднем коэффициенте для прочих шахт Донбасса равном 2—3.

То же справедливо для Кузнецкого бассейна, угольных разрезов Урала и др.

Просачивание воды из поверхностных водотоков и водоемов. Источником обводненности горных выработок нередко являются открытые водотоки и водоемы, расположенные вблизи или непосредственно на месторождении. В этом случае происходит фильтрация воды из открытых водотоков или непосредственно, или через аллювиальные отложения. Особенно значительное увеличение просачивания воды наблюдается в периоды прохождения в реке высоких весенних паводков.

Большая обводненность некоторых бокситовых рудников, где руды залегают среди закарстованных известняков, имеющих выходы на поверхность, в том числе и по долинам рек, объясняется в значительной степени питанием их поверхностными водами протекающих вблизи рек и ручьев.

Обнаженность пород. Величина притока в горные выработки зависит от степени обнаженности водопроводящих пород месторождения. Питание подземных вод обычно происходит в местах выхода на поверхность водопоглощающих пород по склонам речек и балок. Обводненность месторождения прямо пропорциональна обнаженности пород при одинаковой трещиноватости их и прочих равных условиях.

Литологический состав вмещающих пород месторождения непосредственно предопределяет его обводненность. Меньшей обводненностью обладают месторождения, сложенные пластами осадочных сцементированных пород (песчаниками, сланцами, аргиллитами, алевролитами, прослоями известняка и угля). Наиболее интенсивный быстро иссякающий приток воды в горные выработки поступает из прослоев известняка. Из песчаников и аргиллитов поступает обычно небольшой приток. Глинистые сланцы, алевролиты и угли, будучи более пластичными породами, являются водоупорными горизонтами, изолирующими смежные водоносные пласты.

Значительной обводненностью обладают месторождения, в геологическом разрезе которых преобладают закарстованные известняки

---

* Коэффициентом водообильности называется отношение количества откачиваемой воды к количеству добываемого полезного ископаемого за тот же период времени (обычно за год).

(Кизеловский угольный бассейн, Миргалимсайское месторождение в Казахстане и др.) и другие карстующиеся породы.

Наиболее тяжелые гидрогеологические условия наблюдаются на месторождениях, сложенных рыхлыми обломочными породами, где пласт полезного ископаемого залегает между рыхлыми водопроницаемыми породами. Таковы гидрогеологические условия месторождений бурого угля Подмосковного бассейна, Никопольских марганцевых месторождений, огнеупорных глин в районе Пятихаток в УССР и многих других.

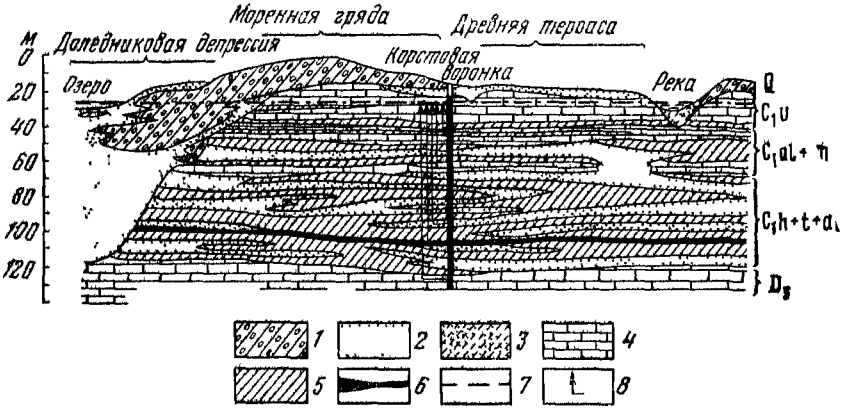


Рис. 80. Геологический разрез месторождения с наличием ледниковой долины (по Л. П. Нелюбову)

1 — моренные отложения; *2* — пески равной крупности; *3* — пески иловатые и глинистые, *4* — известняки и доломиты; *5* — глины; *6* — полезное ископаемое; *7* — свободный уровень подземных вод; *8* — напорный уровень подземных вод

Тектоника района. Зоны тектонических нарушений в сцементированных породах являются местами сосредоточенного, иногда катастрофического поступления воды в горные выработки. На одной из шахт Донбасса в 1948 г. в один из штреков, где была вскрыта сбросовая трещина в почве, стала поступать вода в количестве до 300 *м*³/*ч*, вследствие чего шахта была затоплена. На этой же шахте, но уже в 1952 г. при вскрытии сбросовой трещины в другом месте приток достигал 1000—1100 *м*³/*ч*, что для условий Донбасса является уникальным явлением.

Глубина горных выработок. В зависимости от геолого-гидрогеологических условий и интервала глубины притоки воды и коэффициент водообильности с глубиной горных выработок могут уменьшаться и увеличиваться.

В Донбассе максимальные притоки в шахты наблюдаются на глубине до 150—200 *м* от поверхности. Некоторое уменьшение притока, но не везде наблюдается с глубины 150—200 и до 300—500 *м*. На глубине свыше 500 *м* отмечается заметное уменьшение притоков. Уменьшение водопритока (коэффициента водообильности) с глубиной

объясняется уменьшением степени трещиноватости скальных пород с глубиной и заполнением трещин глинистым материалом.

Но имеются и отклонения от этого общего правила. Например, на одном из месторождений сульфидных руд, где вода в выработки поступает из реки через аллювиальные отложения и трещинную зону кровли рудной залежи, трещиноватость которой возрастает вследствие процессов сдвижения, приток в интервале глубин 45—112 *м* и ниже неуклонно растет пропорционально примерно глубине рудника.

Формы погребенного рельефа. Водообильность ряда месторождений обусловлена погребенными формами рельефа. Древние размывы, выполненные в более позднее время хорошо фильтрующими отложениями, служат мощными коллекторами подземных вод. В подобных местах нередко осуществляется не только гидравлическая связь нескольких водоносных горизонтов, но также связь с поверхностными водотоками и водоемами. Древние эрозионные долины обнаружены на буроугольных месторождениях Западного крыла Мосбасса (рис. 80), на Коробковском месторождении железных руд (КМА), на железорудных месторождениях Урала, в Донбассе и в других местах.

Влияние старых затопленных выработок. Большие объемы подземных вод накапливаются в старых заброшенных выработках. Прорыв этих вод в действующие горные выработки является одной из наиболее распространенных причин частичного или полного затопления рудников.

Влияние незатампонированных разведочных скважин. По окончании бурения каждая разведочная скважина ликвидируется, при этом из нее извлекают обсадные трубы и ее тампонируют жирной глиной или цементом, чтобы вода из водоносных горизонтов, залегающих среди пород кровли и почвы полезного ископаемого, не смогла прорваться в горные выработки при их проходке. При плохом тампонаже скважин в случае подработки последних горными выработками из них очень часто прорывается вода, в ряде случаев в значительном количестве. Например, в одной из шахт Донбасса при подсечении штреком незатампонированной скважины из последней поступала вода в количестве 150 $м^3/ч$.

Принятая система ведения горных работ. Поступление воды в выработки может зависеть от принятой системы проводимых горных работ и неудачного отвода откачиваемых шахтных вод. При работах с обрушением кровли сдвижение пород достигает дневной поверхности и на ней появляются воронки, зияющие трещины и т. п. В этих случаях необходимо проводить планировочные работы, ограждающие поверхность шахтного поля от скопления атмосферных осадков и сбрасываемых шахтных вод. На некоторых шахтах производят посадку кровли в лавах в неблагоприятных гидрогеологических условиях. Такими неблагоприятными условиями являются близкое залегание в кровле открытых водотоков или мощной толщи водоносных аллювиальных и флювиогляциальных песков.

При расположении горных выработок в пределах долин рек можно допускать обрушение над выработками только при наличии в кровле мощной толщи пластичных пород (глин, пластичных глинистых сланцев), в которых в зоне обрушения не создается открытых трещин.

§ 78. Классификация месторождений по степени обводненности

Гидрогеологические условия и обводненность месторождений оцениваются с учетом всех рассмотренных природных факторов. По П. П. Климентову [17, 19] все месторождения по степени и характеру обводненности подразделяются на семь типов.

Подразделение месторождений на определенные типы во многих случаях довольно условно, поскольку нередко на условия обводненности выработок наряду с геологическим строением и гидрогеологическими условиями влияют и другие факторы. Помимо этого, геологическое строение и гидрогеологические условия на месторождениях, расположенных на значительных площадях, непостоянны. Тем не менее типизация месторождений по степени обводненности имеет существенное значение, так как облегчает решение многих вопросов при организации разведочных и ведении эксплуатационных работ. Необходимо только совершенствовать и уточнять существующие классификации.

I тип — месторождения, в геологическом разрезе которых широко развиты карстующиеся породы (известняки, доломиты, гипсы). Эти месторождения отличаются наиболее высокой водообильностью. Притоки в отдельные шахты иногда достигают 10 000 $м^3/ч$, а коэффициент водообильности 250—300. Особенно значительные притоки наблюдаются при наличии взаимосвязи между подземными и поверхностными водами и водоемами.

II тип — месторождения соляные. Обводненность данных месторождений обычно незначительна. Это обусловливается тем, что соляные месторождения сверху перекрываются мощными глинистыми пластами, которые предохраняют залежи соли от размыва. Существенным фактором, также предотвращающим залежи соли от размыва, является высокая степень пластичности солей, в силу чего образующиеся в них при тектонических движениях трещины очень быстро смыкаются, что исключает возможность движения подземных вод непосредственно в соляной залежи.

III тип — месторождения, приуроченные к мощной толще рыхлых осадочных пород (песчано-глинистых, песчаных и т. п.). Водообильность месторождений этого типа зависит от общих физико-географических условий (климата, рельефа и т. п.). При наличии благоприятных условий для инфильтрации водообильность шахт может быть высокой, притоки достигают 100—400 $м^3/ч$ и более. Коэффициент водообильности шахт, разрабатывающих эти месторождения, колеблется от 2 до 15 и более, достигая на некоторых шахтах 40.

Особенностью данных месторождений являются также частые прорывы плывунов в горных выработках что значительно осложняет ведение эксплуатационных работ.

IV тип — месторождения, приуроченные к скальным трещиноватым породам, перекрытым рыхлыми образованиями, залегающими в верхней части. Водообильность этих месторождений зависит от степени трещиноватости скальных пород и от общих физико-геологических условий. При наличии гидравлической связи с поверхностными водами притоки в горные выработки могут достигать 400—600 $м^3/ч$ и более, возрастая с увеличением глубины выработок. Коэффициент водообильности в отдельных случаях достигает 10—15.

V тип — месторождения, приуроченные к скальным трещиноватым породам. Водообильность месторождений зависит главным образом от общих физико-географических условий, а также от степени трещиноватости и тектонической нарушенности. Водообильность шахт обычно невелика. Притоки не превышают нескольких десятков кубических метров в час, увеличиваясь до 100—150 $м^3/ч$ только при наличии вблизи выработок поверхностных водотоков и водоемов. Коэффициент водообильности изменяется от долей единицы до 1—3.

VI тип — месторождения с любым геологическим разрезом, расположенные на междуречье с относительно высокими отметками, а также в горных районах выше местных базисов эрозии, в результате чего они хорошо сдренированы. Притоки небольшие и борьба с рудничными водами никаких трудностей не вызывает.

VII тип — месторождения, расположенные в толще многолетнемерзлых пород. В большинстве своем они безводные или слабоводообильные. Исключением являются месторождения, расположенные на побережье полярных морей и обводняемые морскими водами, температура которых на глубине до 200 $м$ составляет минус 4—5° С; притоки воды в этих случаях могут достигать 100—300 $м^3/ч$ и более.

Значительные осложнения при эксплуатации месторождений, приуроченных к многолетнемерзлым породам, вызывают участки распространения таликов. Основное внимание в подобных случаях должно быть обращено на борьбу с притоками в горные выработки поверхностных вод, которые могут поступать через талые участки, причем вследствие привноса тепла циркулирующими водами их отепляющее действие способствует размораживанию пород, что влечет за собой увеличение притоков с течением времени. В качестве профилактической меры разработку рекомендуется вести начиная с участков, наиболее удаленных от таликов, а в последнюю очередь следует форсированными темпами отрабатывать полезное ископаемое в талых породах. Имеются и другие способы ведения горных работ на месторождениях, где промороженные участки чередуются с талыми, излагаемые в специальных руководствах.

ГЛАВА XX

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГЛАВНЕЙШИХ ТИПОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В § 78 приведена гидрогеологическая классификация месторождений твердых полезных ископаемых. Ниже дается более детальная характеристика гидрогеологических условий этих типов месторождений.

§ 79. Месторождения в условиях карста

К этому типу относятся месторождения угля (Кизеловский бассейн), горючих сланцев (эстонские и гдовские в Ленинградской области), бокситов, Миргалимсайское полиметаллическое месторожде-

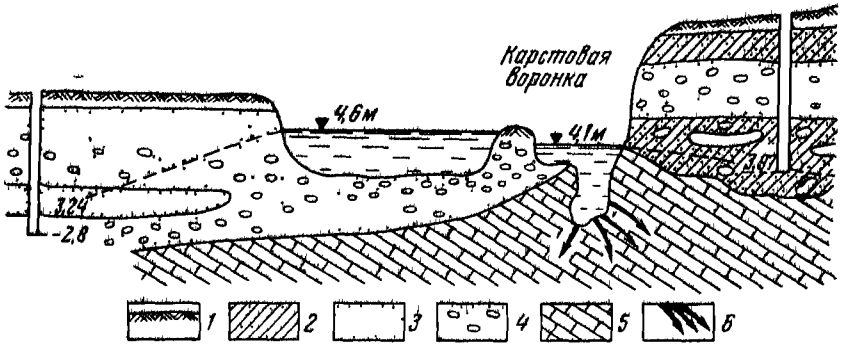


Рис. 81. Схема поглощения речных вод аллювием и карстовой воронкой (по А. А. Коледяжной)

1 — почвенный слой, *2* — супесь; *3* — песок; *4* — песок с галькой; *5* — известняк; *6* — участки поглощения воды

ние и др. Полезные ископаемые на месторождениях данного типа покрываются и подстилаются известняками, доломитами и другими крепкими породами, обычно закарстованными на значительную глубину. На некоторых месторождениях крупные карстовые полости (0,5—10 *м* в поперечнике) прослеживаются на глубине 100—150 *м* ниже местного базиса эрозии и на 300—500 *м* ниже поверхности земли.

Месторождения, залегающие среди закарстованных пород, являются наиболее обводненными. Притоки воды в горные выработки нередко составляют 5000—9000 $м^3/ч$, достигая иногда 12 000 $м^3/ч$. Вода поступает главным образом по трещинам и вскрываемым карстовым полостям.

На некоторых месторождениях речные воды являются основным источником питания подземного потока, циркулирующего по закарстованным породам (рис. 81).

В результате длительного водоотлива из горных выработок режим карстовых вод изменяется на значительной площади, прилегающей к рудному полю (рис. 82), с радиусом по некоторым направлениям в десятки километров, и в сферу действия воронки депрессии попадают русла речек, в результате чего создаются благоприятные предпосылки для поглощения поверхностных вод. Поэтому наиболее опасными в отношении прорыва воды в горные выработки являются участки, залегающие под долинами рек и оврагов или вблизи них.

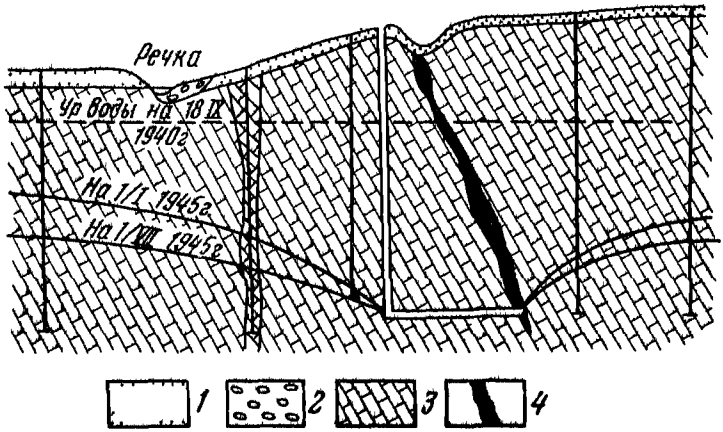


Рис. 82. Развитие депрессионной воронки при водоотливе из горных выработок

1 — песок; *2* — песок с галькой; *3* — известняк; *4* — полезное ископаемое

Подземные воды, движущиеся в толще известняков и доломитов, слабо минерализованы, сухой остаток их изменяется от 200 до 400 *мг/л*, общая жесткость от 2,5 до 5 *мг·экв/л*, воды гидрокарбонатные кальциевые или гидрокарбонатные магниево-кальциевые.

§ 80. Соляные месторождения

Гидрогеологические условия соляных месторождений разнообразны, что обусловливается прежде всего изменчивостью пород кровли, почвы и боковых. На соляных месторождениях выделяют: надсолевые воды, приурочеиные к водоносным горизонтам, расположенным выше соляной залежи и отделяющимся от последней водоупорными породами; околосолевые, или краевые, циркулирующие в породах, окружающих с боков соляную залежь; подсолевые, залегающие в породах под залежью; межсолевые (внутрисолевые), залегающие в отдельных кавернах и пустотах соляной толщи.

Каменная и особенно калийная соль очень легко растворяется и выщелачивается водой. Поэтому в природных условиях соляные

месторождения сохраняются только там, где они полностью предохраняются от растворения водонепроницаемыми породами сверху и с боков. Подсолевые воды оказывают меньшее влияние на разрушение соляных залежей; это возможно только в условиях, когда напорные подсолевые воды поднимаются по тектоническим трещинам, и вызывают разрушение соляной залежи в нижней ее части.

При разработке соляных месторождений необходимо изучать даже небольшие водопритоки. Притоки межсолевых вод опасности для растворения залежи не представляют, так как они предельно насыщены рассолами постоянного (для данных условий) химического состава и удельного веса (до 1,34). Понижение концентрации сухого остатка и уменьшение удельного веса рассолов при их поступлении в горные выработки почти всегда указывают на поступление надсолевых или околосолевых вод, что совершенно недопустимо, учитывая легкую растворимость солей, быстрый рост полостей и трещин в соляной залежи. Это неизбежно с течением времени приводит к затоплению рудника. Даже ничтожные притоки воды и рассолов в горные выработки необходимо быстро и надежно ликвидировать тампонажем путей, по которым вода поступает в выработки. Изоляция опасных участков от остальной площади действующих горных выработок осуществляется путем создания водонепроницаемых перемычек, тампонажа трещин и полостей. При промышленной оценке этих месторождений гидрогеологические условия имеют не меньшее значение, чем качество и запасы солей.

Наиболее перспективным и дешевым способом разработки соляных месторождений является бесшахтный путем выщелачивания водой, нагнетаемой через скважины в залежь соли и откачки через другие скважины образующегося рассола. По мере усовершенствования технологии бесшахтной добычи соли этот способ несомненно получит широкое распространение в нашей стране.

Следует отметить, что бесшахтным способом можно разрабатывать различные месторождения твердых полезных ископаемых — серы, меди, урановых руд, сульфидных руд, цветных металлов (никеля, молибдена, кадмия, кобальта и др.) — путем растворения водой, слабыми кислотами или бактериологическими растворителями.

§ 81. Месторождения в рыхлых несцементированных песчано-глинистых породах

К этому типу относятся месторождения бурых углей, огнеупорных глин, марганца, фосфоритов, россыпи золота, платины и др. Пестрая литология песчано-глинистых пород, невыдержанность песчаных и водоупорных слоев не способствуют образованию выдержанных водоносных горизонтов. Тем не менее в зависимости от положения обводненных пород относительно залежи полезного ископаемого выделяют подпродуктивные, межпродуктивные и надпродуктивные водоносные горизонты. Невыдержанность водоупорных слоев обусловливает наличие гидравлической связи между всеми выделяемыми водоносными горизонтами.

Водообильность месторождений этого типа зависит от общих физико-географических условий района (климата, рельефа и т. п.). При благоприятных условиях для инфильтрации атмосферных осадков водообильность шахт может быть значительной, притоки достигают 100—400 $м^3/ч$ и более (до 1000 $м^3/ч$), составляя в большинстве случаев 50—200 $м^3/ч$.

Характерной особенностью месторождений этого типа является то, что в горных выработках часто наблюдаются прорывы плывунов и борьба с ними приобретает особое значение.

Химический состав подземных вод месторождений описываемого типа во всех водоносных горизонтах почти одинаков, что свидетельствует о наличии гидравлической связи между водами подрудного, межрудного и надрудного водоносных горизонтов. Степень минерализации невысокая; сухой остаток не превышает 1 $г/л$, а общая жесткость не более 10 $мг \cdot экв/л$. Тип воды преимущественно гидрокарбонатный кальциево-натриевый.

§ 82. Месторождения в трещиноватых породах

К этому типу месторождений относятся полиметаллические, железорудные, каменноугольные, жильные цветных и редких металлов и др. Водообильность горных выработок при разработке таких месторождений зависит главным образом от общих физико-географических условий, степени трещиноватости и тектонической нарушенности. Эти условия, как правило, не благоприятствуют накоплению в горных породах значительных количеств подземных вод. Поэтому водообильность шахт обычно невелика. Притоки воды в шахтах составляют десятки кубических метров в час, но при наличии вблизи шахтных полей поверхностных водотоков и водоемов они увеличиваются до 300—600 $м^3/ч$. Коэффициент водообильности изменяется от долей единицы до 1—3 $м^3/ч$, редко больше.

Химический состав рудничных вод крайне разнообразен, изменяясь от слабоминерализованных до высокоминерализованных, воды имеют низкие значения pH, им присуща высокая химическая агрессивность. На месторождениях цветных металлов подземные воды содержат повышенное количество этих металлов, что является поисковым критерием при поисках месторождений, залегающих на значительной глубине («слепых»).

§ 83. Месторождения в трещиноватых скальных породах, перекрытых рыхлыми осадочными образованиями

Обводненность месторождений этого типа зависит от сочетания многих факторов: тектонической нарушенности скальных и покрывающих их осадочных пород; мощности осадочных пород, перекрывающих скальные, и степени их обводненности; наличия гидравлической связи между подземными водами, циркулирующими в песчаных покровных толщах, и поверхностными водами; общих физикогеографических условий конкретных месторождений.

Типичными месторождениями этого типа являются залежи железных руд КМА, Белозерское железорудное в Запорожской области и полиметаллические месторождения на Алтае (Лениногорское, Зыряновское) и др.

Железорудные месторождения КМА отличаются сложными гидрогеологическими условиями, особенно наиболее крупные из них Яковлевское и Гостищевское. Водоносные горизонты имеются во всей покрывающей толще, что при строительстве и эксплуатации рудников имеет существенное значение. Воды всех водоносных горизонтов слабо минерализованы; сухой остаток верхних горизонтов равен 0,2—0,4 *г/л*, нижних 0,4—1 *г/л*. Воды мезозойских отложений гидрокарбонатные кальциевые, а палеозойских и докембрийских — гидрокарбонатно-хлоридные натриевые и хлоридно-гидрокарбонатные натриевые. Залегание пресных вод на значительных глубинах (до 500—700 *м*) свидетельствует о наличии постоянного движения подземных вод к областям разгрузки.

В пределах одного месторождения полиметаллических руд протекает речка и ее притоки, также имеющие ряд притоков. Долины указанных речек выполнены песчано-галечниковыми аллювиальными отложениями, мощность которых местами достигает 130 *м*. Коэффициент фильтрации песчано-галечниковых отложений 100—130 *м/сутки*. Кристаллические породы, вмещающие рудную залежь, разбиты тектоническими нарушениями, по трещинам которых циркулируют подземные воды.

Добыча руд на месторождении ведется с 1837 г., но наиболее интенсивно горные работы стали развиваться с 1953 г. Они ведутся без обрушения кровли с оставлением охранных целиков, что приводит к значительным потерям полезного ископаемого (десятки процентов). Выработанное пространство закладывается. Но при такой системе разработок поверхность над выработками сохраняется и при наличии разветвленной сети горных выработок, насчитывающих десятки километров, суммарный водоприток не превышает 500 $м^3/ч$.

В целях максимального извлечения из недр полезного ископаемого наиболее экономичными способами (с обрушением кровли и частично открытым способом), помимо отвода речки и ее притоков, осушение месторождения осуществляется при помощи трех дренажных линий, состоящих из дренажных штреков, сквозных и забивных фильтров. До сработки статических запасов в дренажную систему будет поступать около 10 000 $м^3/ч$, а в последующем стабильный приток за счет динамических запасов будет составлять около 5000 $м^3/ч$.

§ 84. Месторождения в районах распространения многолетнемерзлых пород

При разработке месторождений, расположенных в районах распространения многолетнемерзлых пород, горные выработки в большинстве своем безводные либо же притоки составляют всего лишь несколько кубометров в час. Вода поступает в выработки в ви-

капежа или небольшими струями. Только при вскрытии подмерзлотных вод, обладающих значительными напорами, притоки могут достигать десятков кубометров в час.

Более водообильными являются месторождения, расположенные на побережье полярных морей. При их разработке в горные выработки по трещинам поступают соленые низкотемпературные воды; притоки могут достигать 100—200 $м^3/ч$ и более. Подземные воды на подобных месторождениях имеют отрицательную температуру (до —5° С), они высокоминерализованные хлоридного-натриевого состава (морского типа), что говорит о проникновении в горные породы по трещинам морской воды. Об этом свидетельствуют и данные прямых наблюдений. В Баренцбурге (на острове Шпицберген) под толщей мерзлых пород на глубине 199 *м* скважиной была вскрыта вода с плотным остатком до 35 *г/л*. Статический уровень воды в скважине установился на отметке, близкой к отметке воды в море, а колебания уровня в скважине полностью отражали приливы и отливы моря, что свидетельствует о наличии несомненной гидравлической связи подземных вод с морской.

Значительные осложнения при эксплуатации месторождений в районах многолетнемерзлых пород встречаются в местах распространения таликов, особенно широко распространенных по долинам рек. На Охотско-Колымском и Чукотском нагорьях имеются многочисленные сквозные водоносные талики площадью до 0,3—1 $км^2$. Основное внимание в подобных случаях должно быть обращено на борьбу с притоками в горные выработки поверхностных вод. При вскрытии горными выработками таликов поступающая по трещинам вода способствует размораживанию горных пород, в связи с чем усиливается движение подземных вод по трещинам, а это приводит к увеличению с течением времени притоков в горные выработки.

При разработке месторождений в районах многолетнемерзлых пород необходимо тщательно учитывать местные гидрогеологические условия: распространение таликов, наледей, гидролакколитов, сезонной мерзлоты и т. п. Учет всех этих факторов в их совокупности позволит вести разработку конкретного месторождения наиболее выгодными в экономическом и техническом отношениях способами.

ГЛАВА XXI

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

§ 85. Общие сведения

Знание химического состава подземных вод месторождений полезных ископаемых и рудничных вод важно для выяснения: влияния подземных вод на формирование различных руд и последующего их изменения, обусловленного процессами выветривания и

выщелачивания; влияния химического состава подземных вод на рудничные механизмы, горное оборудование, крепление и т. п.; возможности использования рудничных вод для питьевого и технического водоснабжения; использования химического состава подземных вод как поискового признака.

Направление процессов, формирующих химический состав подземных вод, обусловливается геохимической обстановкой, в которой находятся месторождения и водоносные горизонты. В земной коре выделяются три типа природных условий, различие между которыми относительно четко отражается на составе растворенных в воде компонентов, а следовательно, и на типе подземных вод.

1. *Окислительная* обстановка характеризуется наличием в подземных водах газов воздушного происхождения: кисло-

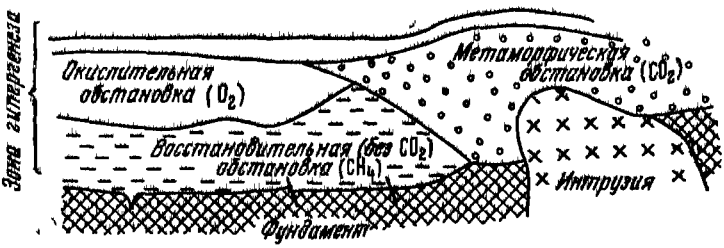


Рис. 83. Схема природных обстановок (по А. М. Овчинникову)

рода, азота и углекислоты. В этой обстановке происходит интенсивное выщелачивание горных пород.

2. *Восстановительная* обстановка отличается наличием в подземных водах газов биохимического происхождения: углеводородов, азота, сероводорода.

3. *Метаморфическая* обстановка характеризуется наличием газов, образующихся при метаморфизме горных пород под влиянием высоких температур. В этой обстановке формируются гидротермальные растворы, из которых затем образуются гидротермальные рудные месторождения.

Эти три типа геохимических обстановок в зависимости от особенностей геологической истории данного региона могут сочетаться друг с другом, а нередко на отдельных участках происходит наложение одной обстановки на другую (рис. 83). Следовательно, для более точного определения гидрогеохимической обстановки при разведке месторождений полезных ископаемых необходимы изучение свободно выделяющихся и растворенных в подземных водах газов и изучение окислительно-восстановительного потенциала.

§ 86. Подземные воды сульфидных месторождений

Сульфидные месторождения в наибольшей степени воздействуют на химический состав подземных вод. Сами по себе сульфиды обладают очень малой растворимостью. Но при их окислении в присут-

ствии инфильтрационных вод, насыщенных кислородом, в верхних горизонтах сульфидных руд образуются хорошо растворимые в воде сернокислые соединения.

В результате окисления сульфидов образуются серная кислота, сульфаты металлов и сероводород. Серная кислота, попадая в подземные воды, диссоциируется, что приводит к увеличению в воде сульфат-иона и водородных ионов, а накопление последних снижает водородный показатель воды pH. Наиболее интенсивно этот процесс идет при окислении дисульфидов и их аналогов, а следующие затем вторичные процессы влекут за собой окисление и других сульфидов. Поскольку пирит и халькопирит широко распространены в рудных телах большинства месторождений, то указанные процессы протекают почти на всех рудных месторождениях, в результате чего подземные воды их имеют специфический химический состав, содержат ионы металлов, так как растворимость сульфатов некоторых металлов очень высокая:

сульфаты	$FeSO_4$	$CaSO_4$	$NiSO_4$	$MnSO_4$	$ZnSO_4$
температура воды, °С . . .	0	20	22,6	25	18
растворимость, *г/л*	157	172	274,8	393	531,2

Понижение pH воды обусловливает постепенное уменьшение содержания гидрокарбонатного иона — HCO_3 и увеличение концентрации CO_2, что резко увеличивает агрессивность воды по отношению к карбонатным породам. Взаимодействуя с последними, подобные воды обогащаются ионами алюминия, кальция, магния, натрия и коллоидами кремния за счет растворения карбонатов и алюмосиликатов.

Таким образом, при непосредственном соприкосновении воды с сульфидным рудным телом происходят сложные химические процессы, обусловливающие изменение химического состава подземных вод, а именно: понижение pH; накопление в воде металлов Fe^{2+}, Fe^{3+}, Pb^{2+}, Al^{3+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} и т. п., а также SO_4^{2-} и SiO_2; повышение общей минерализации воды, но с малым содержанием хлор-иона; накопление в воде растворенной углекислоты и сероводорода. В зависимости от конкретных природных условий интенсивность и характер указанных изменений самые различные.

Сложность процессов, обусловливающих формирование химического состава подземных вод в районах залегания сульфидных месторождений, и зависимость этих процессов от совокупного влияния многих факторов затрудняют разработку генетической классификации и научно обоснованного районирования изменения химического состава вод под влиянием рудных тел в районах расположения таких месторождений.

Изучение химического состава подземных вод районов рудных месторождений имеет большое практическое значение как поисковый признак. Гидрогеохимический метод является одним из наиболее достоверных методов геохимических поисков месторождений полезных ископаемых и в сочетании с другими геохимическими методами

и поисковыми работами дает возможность обнаруживать месторождения меди, цинка, молибдена, свинца, урана, ванадия, никеля, олова, хрома, кобальта и других металлов.

При гидрогеологических исследованиях для целей водоснабжения в районах рудных месторождений следует учитывать, что по мере развития горных работ и сопровождающемся при этом осушении значительной площади, прилежащей к руднику, процессы окисления в пределах данной площади будут идти более интенсивно. Это может обусловить обогащение подземных вод (не только рудника, но и более широкого района) элементами в количествах, превышающих нормы, установленные ГОСТ 2874—54, что нередко происходит спустя длительное время после проходки горных выработок. Очень часто резкое увеличение содержания ряда элементов в подземных водах происходит при повышении уровня последних, обусловленном либо естественными колебаниями, либо же уменьшением или остановкой водоотлива из горных выработок. При подъеме уровня продукты окисления, накапливающиеся в горных выработках, растворяются, что и приводит к обогащению вод теми или другими элементами.

Иногда рудничные воды используют для извлечения из них металлов. Разработанные в последнее время методы селективного извлечения из подземных вод различных компонентов при помощи ионитов дают возможность получать исключительно чистые редкие металлы.

§ 87. Подземные воды каменноугольных месторождений

На каменноугольных месторождениях наблюдается определенная зональность химического состава подземных вод, подчиняющаяся в принципе общей вертикальной зональности, но имеющая и некоторые специфические особенности. Как известно, в углях и вмещающих породах в значительных количествах содержатся сульфиды, главным образом пирит и марказит, а также органические сернистые соединения. По данным А. В. Докукина, средняя сернистость углей в Донбассе равна 3,5%, в Кизеловском бассейне 5,5%, в Подмосковном 3,5%; при этом преобладает сера в сульфидной форме. Содержание сернистых органических соединений не превышает 0,19—1,52%.

В верхних зонах литосферы благодаря доступу воздуха и хорошей промытости пород инфильтрационными водами, богатыми растворенным кислородом, сернистые соединения интенсивно окисляются. Образующиеся при этом продукты окисления уносятся инфильтрующимися водами в более глубокие зоны. Таким образом, в верхней части формируются слабоминерализованные воды гидрокарбонатного натриевого состава.

В более глубоких зонах окисление сульфидов идет менее интенсивно, в основном за счет растворенного в инфильтрующихся водах кислорода. Образующаяся при этом серная кислота остается на месте, обогащая подземные воды. Обогащение сульфатами идет

также за счет привноса из верхней зоны. Таким путем гидрокарбонатные воды превращаются в гидрокарбонатные сульфатные.

При наличии глинистых пород, содержащих в обменном комплексе натрий, последний будет вытесняться ионами кальция, присутствующим в подземных водах, которые поступают из более высоких зон. В результате подобных обменных реакций образуются сульфатные натриевые воды.

В еще более глубоких зонах в условиях анаэробной среды и в присутствии метана развивается деятельность десульфирующих бактерий, ведущая к восстановлению сульфатов. В результате формируются щелочные метановые воды гидрокарбонатного натриевого состава.

В еще более глубоких зонах в условиях застойной среды гидрокарбонатные натриевые воды постепенно смешиваются с погребенными водами морских и лагунных осадочных отложений, обогащаются хлоридами и превращаются в хлоридно-гидрокарбонатные натриевые повышенной минерализации.

При ведении очистных работ в угольных шахтах создаются исключительно благоприятные условия для окисления сульфидов и органических веществ с образованием серной кислоты, с чем и связано образование кислых шахтных вод. Как правило, верхние горизонты дают наиболее кислые воды, что обусловливается попаданием в них в первую очередь инфильтрующихся осадков, богатых растворенным кислородом.

Кислые шахтные воды обладают высокой коррозирующей способностью и вредно действуют на насосы, трубы, рельсы, горные механизмы, бетонную и металлическую крепь, на одежду и обувь рабочих. Для предотвращения отрицательного действия кислых вод при ведении горных работ осуществляют различные мероприятия.

§ 88. Подземные воды соляных месторождений

На месторождениях каменной соли химический состав подземных вод непосредственно связан с химическим составом солей и вмещающих их пород и зависит от положения подземных вод по отношению к соляной залежи.

Гидрохимические условия различных типов подземных вод соляных месторождений имеют существенное значение при их разработке. Постепенное снижение водопритока, постоянство химического состава рудничных вод в процессе эксплуатации, тип древних маточных рассолов свидетельствуют о том, что данные воды не связаны с надсолевыми и краевыми водами. Вследствие предельной насыщенности эти воды не способны растворять соли и их присутствие не опасно для рудника. Появление же в руднике вод с постоянно уменьшающейся концентрацией является признаком проникновения инфильтрационных вод, обладающих большой растворяющей способностью, что крайне опасно. В подобных случаях требуется установление путей инфильтрации в рудник надсолевых или краевых вод и принятие соответствующих предохранительных мер.

§ 89. Подземные воды месторождений редких и рассеянных элементов

В связи с развитием электроники, космических исследований и атомной техники резко возросла потребность в редких и рассеянных элементах: литии, рубидии, цезии, бериллии, тантале, ниобии, кадмии, селене, теллуре, стронции, скандии, индии, германии, галлии, таллии, цирконии, гафнии, рении и редкоземельных элементах. Многие из указанных редких и рассеянных элементов встречаются как примеси в полиметаллических сульфидных месторождениях и служат *корреляционными показателями*. На некоторых месторождениях повышенное содержание рассеянных элементов обнаружено в водах, типичных для данных гидрогеохимических условий (гидрокарбонатных, гидрокарбонатных сульфатных и др.).

Концентрация рассеянных элементов в залежи промышленного значения требует определенных условий, когда миграционная способность элементов резко изменяется. А. И. Перельман участки зоны гипергенеза, где изменяется миграционная способность элементов, называет геохимическими барьерами. Им выделено два класса геохимических барьеров: термодинамические, в которых изменяются давление и температура, что имеет место в очагах разгрузки подземных вод, и физико-химические.

Исследования по изучению миграции в подземных водах лития, бериллия, стронция, ниобия и других элементов, проведенные К. Е. Питьевой в районе избыточного увлажнения, где залегают интрузивные породы щелочного состава, показали, что переход этих элементов в раствор происходит вследствие углекислотного разрушения минералов и пород.

Понятие «геохимический барьер» применимо не только к скоплению редких и рассеянных элементов, но и железа, марганца, алюминия, хрома, никеля и др. Следовательно, залежи редких и рассеянных элементов обычно встречаются в сочетании с рудами широко распространенных элементов. Примером этого являются результаты гидрогеохимической съемки, проведенной В. М. Матусевичем и А. А. Лукиным. Вблизи россыпного месторождения циркона содержание циркония в подземных водах превышало 0,5 *мг/л*, а вне россыпей колебалось в пределах 0,01—0,005 *мг/л*. В водах с повышенным содержанием циркония было отмечено 10—12 других элементов, а на безрудных участках — четыре-пять элементов. На месторождении были обнаружены также ильменит, титан, хром, ванадий, бериллий, местами олово, серебро, никель и кобальт.

§ 90. Гидрогеохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых

Гидрогеохимия изучает миграцию химических элементов в природных водах и является составной частью геохимии и гидрогеологии. При помощи разработанных в последнее время высокочувстви-

тельных методов анализа в природной воде можно определять большинство химических элементов. Месторождения полезных ископаемых создают в поверхностных и подземных водах ореолы рассеяния элементов, которые являются хорошими поисковыми признаками месторождений, залегающих в зоне гипергенеза. Широкое внедрение гидрогеохимических исследований дало обширный фактический материал о водных ореолах рассеяния для различных типов месторождений, расположенных в горноскладчатых и платформенных областях, в гумидном и аридном климатах, а также в породах зоны многолетней мерзлоты. Результаты этих исследований опубликованы в многочисленных работах, в частности в фундаментальном труде А. И. Перельмана «Геохимия ландшафта».

Важную роль в миграции играют свойства самих элементов: порядковый номер, атомный вес, валентность, ионный радиус, потенциал, поляризация ионов, энергетические, радиоактивные, диффузионные, гравитационные и другие их особенности. Они определяют степень растворимости природных соединений, форму нахождения элементов в природных водах, регулируют процессы выпадения их в осадок, а также сорбционные, диффузионные, гравитационные и другие процессы водной миграции. Как известно, вода является универсальным растворителем, однако содержание отдельных элементов в водной среде различно и зависит от чрезвычайно сложного сочетания многих факторов, обусловливающих миграцию элементов в земной коре.

Миграция элементов в водном растворе связана с их способностью образовывать легкорастворимые соединения. Процесс растворения элементов, входящих в рудную залежь, очень сложен, он зависит от энергии кристаллической решетки и энергии гидратации ионов, что в свою очередь находится в сложной зависимости от свойств элементов и внешних условий (давления, температуры, реакции воды, окислительно-восстановительного потенциала, состава бактерий, находящихся в воде, скорости движения подземных вод, геологического строения месторождения и др.).

В целом вопросы миграции рудных элементов довольно сложны, полностью не познаны и требуют дальнейшего изучения. Однако изученные закономерности миграции элементов в водной среде позволяют с большим успехом применять гидрогеохимические методы при поисках различных месторождений полезных ископаемых. Гидрогеохимические исследования являются одним из видов геохимических методов.

При проведении гидрогеологических исследований существенное значение имеет оценка общих перспектив нахождения в районе исследований некоторых полезных ископаемых по гидрогеохимическим признакам. Гидрогеохимические признаки применяются при изучении механических, солевых и газовых ореолов рассеяния полезных ископаемых и дают особенно надежные данные в районах распространения нефтяных и газовых залежей, месторождений различных солей, руд цветных и редких металлов и других полезных

ископаемых. Гидрогеохимические признаки в комплексе с другими методами позволяют обоснованнее выделять перспективные участки для последующей постановки более детальных поисковых работ. Содержание различных солей и металлов необходимо определять в поверхностных и подземных водах, распространенных на картируемой территории, так как потоки рассеяния зон рудной минерализации наблюдаются в природных водах всех типов: поверхностных, грунтовых, пластово-трещинных и трещинных.

Гидрогеохимический метод основан на изучении изменений химического состава поверхностных и подземных вод под влиянием

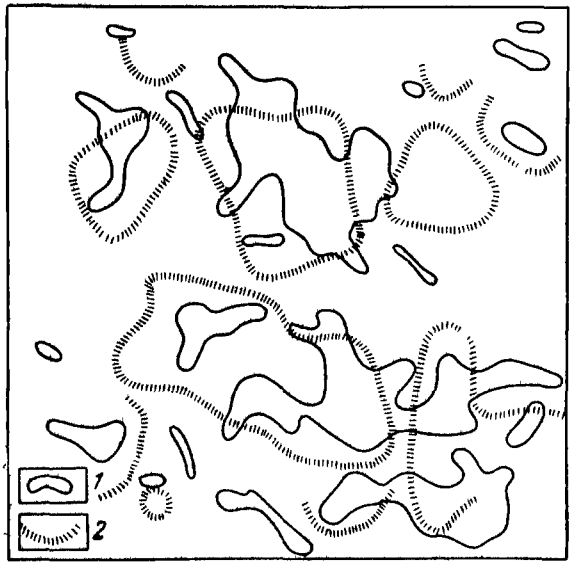


Рис. 84. Сопоставление гидрогеохимических и металлометрических данных (по П. А. Удодову)
1 — ореолы рассеяния по данным металлометрического опробования рыхлых образований; *2* — ореолы рассеяния по данным гидрогеохимических исследований

рудных залежей. На изменение химического состава подземных вод оказывают влияние и глубокозалегающие рудные тела, не выходящие на дневную поверхность (слепые залежи), что обусловлено диффузионным перемещением ионов тяжелых металлов от мест их большей концентрации к меньшей, а также переливом вод из одного водоносного горизонта в другой, благодаря чему и происходит обогащение металлоносности подземных вод в районах глубокого залегания рудных тел.

Гидрогеохимический метод поисков по возможностям и значению может быть поставлен на второе место после металлометрических съемок при изучении верхней части литосферы, при изучении же более глубоких зон он имеет неоспоримые преимущества перед всеми остальными методами геохимических поисков рудных залежей и других полезных ископаемых. Сопоставление данных гидрогеохимических и металлометрических съемок показано на рис. 84, из которого видно, что ореолы рассеяния, полученные по данным гидро-

геохимического опробования, значительно превышают площади, выявленные по данным металлометрической съемки.

Отчетливые гидроореолы рассеяния протяжением от нескольких сотен метров до нескольких километров образуют наиболее подвижные в зоне гипергенеза рудные элементы: медь, цинк, молибден, уран, никель, кобальт, ванадий, олово, свинец, хром и др.; существенное значение имеет сульфат-ион, весьма характерный для ореолов рассеяния сульфидных месторождений.

Успешному применению гидрогеохимического метода способствуют расчлененный рельеф и хорошо развитая гидросеть. При благоприятных условиях по водным ореолам рассеяния удавалось обнаруживать рудные залежи на глубине до 100—200 *м*. Вот почему гидрогеохимический метод считается наиболее глубинным из всех геохимических методов.

В поверхностных и подземных водах в той или иной степени мигрируют почти все химические элементы, содержание которых увеличивается в водах, дренирующих рудные месторождения, о чем свидетельствует табл. 12 (по. В. И. Красникову).

Из табл. 12 следует, что содержание металлов в водных ореолах рассеяния около рудных залежей возрастает в десятки и сотни раз по сравнению с безрудными районами.

Таблица 12

Содержание металлов в водных ореолах рассеяния, *г/л*

Металл	Реки и подземные воды безрудных районов	Воды, дренирующие месторождения данного металла
Никель	$n \cdot 10^{-6} — n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-5} — n \cdot 10^{-3}$
Кобальт	$n \cdot 10^{-7} — n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-5} — n \cdot 10^{-3}$
Уран	$n \cdot 10^{-8} — n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-5} — n \cdot 10^{-3}$, иногда до $n \cdot 10^{-2}$
Молибден	$n \cdot 10^{-7} — n \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-5} — n \cdot 10^{-4}$
Свинец	$n \cdot 10^{-7} — n \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-5} — n \cdot 10^{-3}$

Водные потоки рассеяния всегда вытянуты по направлению движения вод. Чаще всего ореолы рассеяния имеют форму сектора (при однородной водопроницаемости пород), веера (при изменяющемся составе пород) или шлейфа (при потоке по ущелью или долине). В очагах разгрузки напорных вод они фиксируются в виде «языка», направленного из закрытой части структуры в центр депрессионной воронки (рис. 85).

При гидрогеохимических поисках прежде всего нужно иметь данные о среднем так называемом ф о н о в о м содержании металлов в водах данного района, которое не является постоянным для всех районов и зависит от геологических и биоклиматических факторов (сорбции минеральными и органическими сорбентами, селективной избирательности растений, зональности грунтовых вод, сезонности минерализации природных вод и др.).

Гидрогеохимические поиски основаны на опробовании вод источников, ручьев и мелких рек. Опробование вод крупных рек — Волги, Енисея, Лены, Амура и других не может быть эффективным, так как их воды представляют собой смесь вод огромного количества более мелких рек, стекающих с большой водосборной площади. Поиски на мелких реках и ручьях ведутся вверх по течению как при металлометрической съемке, что и позволяет установить за короткий срок участки оруденения, обусловливающие аномалию химического состава подземных вод даже в случае глубокого залегания рудного тела.

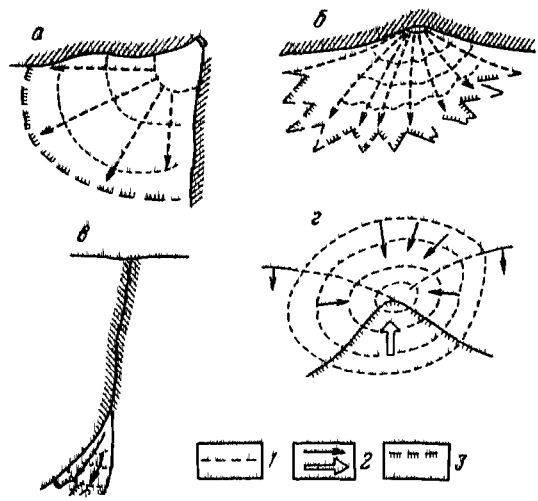


Рис. 85. Формы ореолов рассеяния в потоках грунтовых вод

а — сектор; *б* — веер; *в* — шлейф; *г* — «язык»; *1* — гидроизогипсы; *2* — направление движения вод, *3* — контуры ореолов рассеяния

Изменения химического состава подземных вод в основном прослеживаются в направлении их движения от рудных тел. Однако в связи с наличием первичных и вторичных ореолов рассеяния месторождений в окружающих породах и процессов диффузии эти изменения могут отмечаться и выше рудных тел, а также вверх по течению водоносного горизонта, что расширяет поисковые возможности метода. Таким образом, вокруг рудных тел образуются ореолы подземных вод измененного химического состава, имеющие обычно весьма сложную конфигурацию; площадь их во много раз превосходит площадь соответствующих рудных тел. Эти ореолы, названные известным геохимиком А. А. Сауковым ***жидкими***, или ***водными***, ***ореолами рассеяния***, обнаруживаются по анализам проб воды, взятых из разных водоисточников, в которых имеются повышенное по отношению к фоновому содержание сульфат-иона, повышенная общая металлоносность различных типов вод, определенная ассоциация тяжелых металлов в воде, соответствующая их наличию в руде, низкое значение pH (кислые воды). Гидрогеологическим показателем наличия рудного тела является не абсолютное содержание каких-либо компонентов минерализации, а относительно повышенное (или пониженное) содержание этих компонентов по сравнению с фоновым.

При гидрогеохимических поисках основным объектом изучения являются грунтовые воды четвертичных отложений и трещинно-грунтовые воды зоны выветривания, так как они более доступны и в ни

более интенсивно протекают процессы миграции химических элементов. Необходимо также проводить гидрогеохимическое изучение поверхностных вод (ручьев и рек) и подземных вод более глубокой циркуляции, имеющих естественные выходы на поверхность или вскрываемых горными выработками и буровыми скважинами.

Существенное значение при применении гидрогеохимического метода поисков рудных месторождений имеют способы химического анализа. Последние должны быть достаточно чувствительными, быстрыми, надежными и пригодными в полевых условиях. В настоящее время в качестве экспресс-метода используются колориметрические методы, обладающие высокой чувствительностью, позволяющие определять содержание металлов в количестве $n \cdot 10^{-4} - n \times \times 10^{-7}$ *г/л*. Широко применяются также спектральный и полярографический методы анализов, но их применение требует предварительного обогащения проб воды: выпаривания до небольшого объема или до сухого остатка, экстрагирования, соосаждения исследуемых элементов с «коллекторами», извлечения металлов ионитами.

Во всех случаях пробы воды на анализ отбираются объемом не менее 3—5 *л*. Следует отметить, что количественные поисковые критерии при гидрогеохимических поисках на разные компоненты в зависимости от природных факторов (климатических, геоморфологических, геологических, гидрогеологических и др.) еще не разработаны, что затрудняет оценку района исследований по гидрогеохимическим признакам и характеристику металлоносности различных типов природных вод.

Результаты полевых гидрогеохимических исследований оформляются в виде ряда гидрогеохимических карт: общей сводной карты металлоносности; гидрогеохимических карт по отдельным элементам; детальных карт для наиболее перспективных участков. Составляются также графики для определения фона металлоносности отдельных типов природных вод, графики зависимости металлоносности вод от метеорологических факторов, графики металлоносности поверхностных, грунтовых и других типов подземных вод. При использовании гидрогеохимических карт необходимо также учитывать данные, полученные другими методами поисков. Гидрогеохимические методы поисков получили наиболее широкое применение при поисках и разведке газовых и нефтяных месторождений, где они начали применяться еще в 70—80 годах прошлого столетия, хотя и носили на первых этапах исследований в значительной мере случайный характер. В современном виде учение о гидрогеохимических показателях нефтеносности разработано главным образом В. А. Сулиным и его сотрудниками — А. А. Варовым, Л. А. Гуляевой и другими в 1932—1943 гг.

§ 91. Методика отбора проб воды в целях изучения газового и химического состава вод

В общем комплексе геологоразведочных работ гидрогеохимические методы применяются при поисках рудных и нерудных месторождений, лечебных и промышленных вод, нефтяных и газовых

месторождений, отличаясь от других методов поисков потенциальной глубинностью. Основным объектом исследований при гидрогеохимических поисках являются поверхностные и подземные воды: мочажины, заболоченность и болота; пруды и озера; ручьи и речки в основном второго, третьего и более мелкого порядков; горные выработки (шурфы, канавы, штольни, штреки и др.); колодцы и буровые скважины; источники.

Необходимое количество точек отбора проб воды при различных масштабах съемок приводится в табл. 13. (по А. А. Бродскому).

Из мочажин, заболоченности и болот для целей гидрогеохимических поисков наибольший интерес представляют низинные болота, особенно их разновидности — ключевые болота, которые развиваются в местах выклинивания подземных вод. При взятии проб воды одновременно рекомендуется отбирать пробы илисто-глинистых отложений (донных осадков).

Из прудов, озер и других водоемов пробы воды в первую очередь отбираются из небольших водоемов, питание которых происходит за счет подземных вод. Пробы берутся близ выхода источника. Для характеристики регионального рассеяния элементов отбирают одиночные пробы воды и из крупных озер.

Ручьи и речки опробуются, когда их расход не превышает 1,5 $м^3/сек$. Крупные речки опробуются по очень редкой сетке для определения характера регионального рассеяния. Расстояния между точками отбора проб воды при съемке масштаба 1 : 1 000 000—1 : 500 000 составляет 8—12 *км*, 1 : 200 000—100 000 — 1—1,5 *км*, 1 : 50 000—1 : 25 000 — 200 *м*. При более крупномасштабных съемках расстояние между пунктами отбора проб воды составляет 50—25 *м*. Вода в водотоке отбирается в 0,3—0,4 *м* от берега и обязательно прозрачная.

В подземных горных выработках пробы воды отбираются из капежа в кровле и стенках выработок. Пункты отбора наносятся на погоризонтные планы рудника.

Из колодцев и буровых скважин, а также шурфов и канав пробы воды отбираются после откачек и полного осветления воды и установления в них естественного режима. Отбор проб из поисковых и разведочных скважин производится пробоотборниками, однако они недостаточно пригодны для гидрогеохимических поисков, так как их детали, изготовленные из цветных металлов, в какой-то степени изменяют химический состав отобранной воды, что необходимо учитывать при интерпретации результатов анализа. Имеются различные конструкции пробоотборников и приборов для отбора проб газа, описанные в специальных руководствах [43, 45].

Из источника воду отбирают непосредственно у его выхода в бутылки, полиэтиленовые мешочки, эмалированную и т. п. (не металлическую) посуду.

Объем проб воды зависит от требуемой точности и детальности анализа. Чем выше эти требования, тем больше должен быть и объем пробы (до 3—5 *л*). Слабоминерализованные воды отбираются в большие

Таблица 13

Количество точек отбора проб воды при поисках

Масштаб геолого-поисковых работ	Рекомендуемое количество точек отбора проб воды на 1 км² (ориентировочно)	Общие данные о методике гидрогеохимических поисков	Рекомендуемые виды анализов	Ожидаемые результаты
1:1 000 000—1:500 000	0,02—0,15	Источники подземных вод и поверхностные водотоии и водоемы опробуются выборочно с учетом геологических образований, контактов и тектонических нарушений	Полный спектрохимический анализ и общий химический анализ воды. Определение электрического сопротивления и суммы металлов	Установление регионального рассеяния с гидрогеохимической характеристикой некоторых геологических образований и тектонических зон. Выделение ореолов рассеяния первого порядка, отражающих гидрогеологические особенности рудоносных провинций
1:200 000—1:100 000	0,09—0,5	Опробуются источники подземных вод, ручьи и речки второго, третьего и более мелкого порядков	Сокращенный спектрохимический анализ воды на типоморфный комплекс элементов. Химический анализ воды на элементы-индикаторы. Выборочно — общий химический анализ воды	Выделение ореолов рассеяния второго порядка, отражающих гидрогеохимические особенности рудоносных площадей в пределах регионов или рудоносных провинций
1:50 000—1:25 000	0,7—3,6	Опробуется большинство водопунктов. Специальное опробование поисково-разведочных выработок. Производство водных и кислотных вытяжек твердых пород. Организация режимных наблюдений	Химический анализ воды на элементы-индикаторы. Выборочно — спектрохимический анализ воды	Выделение ореолов рассеяния месторождений. Возможно установление ореолов рассеяния рудных тел
1:10 000 и крупнее	Зависит от сети проходимых выработок, вскрывающих подземные воды	Сплошное опробование водопунктов и горных выработок	Химический анализ воды на элементы-индикаторы	Выявление ореолов рассеяния рудных тел

объемах, чем воды сильно минерализованные. Пробы, предназначенные для определения микрокомпонентов, подкисляются спектрально чистой соляной кислотой из расчета 3 *мл* кислоты на 1 *л* пробы, а при спектральных определениях микрокомпонентов из сухих остатков подкисление проб производится спектрально чистой серной кислотой из расчета 4 *мл* 10%-ной (по объему) серной кислоты на 1 *л* пробы воды. Подкисление проб воды для определения молибдена, мышьяка, бора и галоидов не рекомендуется.

§ 92. Использование шахтных и рудничных вод для нужд народного хозяйства

Шахтные и рудничные минерализованные воды нередко используются после умягчения на хозяйственно-технические нужды (для мойки угля и руды, изготовления стройматериалов, поливки улиц и т. п.). В отдельных случаях возможно использование шахтных вод и для питьевого водоснабжения.

При комплексном решении вопросов осушения месторождений (при их разработке), водоснабжения горных предприятий и населенных пунктов необходимо очень тщательно учитывать влияние осушительных мероприятий на режим подземных вод, используемых населением и промышленными предприятиями. В результате ведения очистных работ с водоотливом создаются глубокие депрессионные воронки с радиусом в десятки километров. Например, по данным В. Н. Славянова и В. И. Фандеевой, непредвиденное быстрое развитие депрессионной воронки на Лебединском карьере КМА нарушило водоснабжение многих поселков.

На ряде месторождений рудничные воды содержат в значительном количестве цветные и тяжелые металлы. Так, на некоторых медных рудниках содержание меди в воде достигает нескольких десятых грамма на литр, а на отдельных участках 2—6 *г/л*. На одном из рудников с величиной водопритока около 100 $м^3/ч$ в выработки в месяц с водой поступает 7,2 *т* растворенной меди. Современные способы извлечения растворенных в воде компонентов позволяют почти полностью осаждать металлы, и в сбрасываемых водах остаются только их следы. Воды нефтяных месторождений часто содержат повышенное количество йода, брома и других компонентов, которые и извлекаются из них.

Исследования рудничных вод, проведенные физиотерапевтическими институтами и поликлиниками, показали, что на ряде месторождений они могут быть использованы для лечения накожных заболеваний, нервной системы и других недугов. Например, Гайский курорт в Оренбургской области использует в бальнеологических целях кислые воды сульфидных месторождений.

ГЛАВА XXII

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПРИТОКОВ В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ

§ 93. Оценка обводненности месторождений при эксплуатации

Как указывалось, прогнозирование притоков воды в горные выработки является одной из важнейших задач гидрогеологии. По существу гидрогеологические исследования, проводимые в процессе разведки, а затем гидрогеологические наблюдения, проводимые в процессе эксплуатации, преследуют одну и ту же основную задачу — как можно точнее определить приток и характер поступления подземных вод в выработки и режим водопритока, в соответствии с чем намечаются и затем уточняются необходимые мероприятия по борьбе с подземными водами.

Теоретически обоснованных методов определения притоков подземных вод в горные выработки нет. Существующие способы позволяют только приближенно, с большей или меньшей степенью достоверности решать отдельные частные задачи применительно к гидрогеологическим особенностям конкретных месторождений, причем гидрогеологические условия шахтного поля всегда обычно приходится в той или иной мере схематизировать. Следовательно, рассматриваемые ниже способы расчета притоков подземных вод в горные выработки схематичны, однако в ряде случаев они дают удовлетворительные результаты.

Притоки подземных вод обычно приходится определять в подготовительные, нарезные и очистные выработки. Последние представляют собой систему горизонтальных, вертикальных и наклонных выработок, расположенных на большой площади и представляющих собой огромную по размерам единую дренажную систему.

Следовательно, при оценке обводненности месторождений полезных ископаемых и прогнозировании водопритоков в горные выработки при ведении очистных работ необходимо учитывать множество факторов в их сложном сочетании, взаимозависимости и взаимовлиянии, в совокупности определяющих степень обводненности данной шахты или рудника. Только такой метод оценки обводненности позволяет более или менее объективно определять характер водопритоков в горные выработки, соответственно чему запроектировать и осуществить наиболее рациональные в технико-экономическом отношении способы борьбы с водопритоками.

§ 94. Изменение режима подземных вод и водопритоков в горные выработки

Характер изменения режима подземных вод на прилежащей к месторождению площади и режим водопритоков в горные выработки зависят в первую очередь от общих физико-географических,

геологических и гидрогеологических условий и затем от принятой системы разработки месторождения, от формы, глубины и объема горных выработок, их пространственного расположения, скорости ведения горных работ и других факторов.

Первоначальная оценка степени обводненности месторождения полезного ископаемого и прогнозирование возможных водопритоков в горные выработки и возможных изменений в их режиме делается на основе результатов детальных гидрогеологических исследований. В дальнейшем, начиная со времени строительства горного предприятия и до конца его существования, природные гидрогеологические условия и естественный режим подземных вод месторождения под влиянием горных выработок и осуществляемых при этом дренажных мероприятий постепенно нарушаются, т. е. являются переменными и зависят от многих природных и искусственных факторов. В результате длительного действия дренажных установок уровень подземных вод понижается на площади, в десятки и сотни раз превышающей площадь шахтного поля, причем по мере углубления горных выработок увеличивается и площадь, на которой проявляется дренирующее влияние водоотлива.

В результате почти на всех месторождениях устанавливается сложная гидравлическая связь между различными водоносными горизонтами, залегающими выше или ниже пласта полезного ископаемого. А поскольку водоносные горизонты имеют свою область питания, в частности, неглубоко залегающие горизонты обычно связаны с поверхностными водотоками и водоемами, то это обусловливает поступление в горные выработки вод не только из вышерасположенных водоносных горизонтов, но и из открытых водотоков и водоемов. В горные выработки вода будет поступать также из нижерасположенных водоносных горизонтов, особенно в тех случаях, когда их пьезометрический уровень имеет отметки, превышающие отметки почвы горных выработок. Все это резко изменяет естественный режим подземных, а нередко и поверхностных вод. Наблюдения показывают, что в наибольшей степени очагами поглощения атмосферных осадков и поверхностных вод служат карстовые воронки, карьеры, овраги, мульды сдвижения и другие понижения.

В результате водоотлива, как указывалось, образуется воронка депрессии. В начале откачек она увеличивается сравнительно быстро; в дальнейшем выполаживание и сглаживание форм воронки протекает весьма медленно, в течение ряда лет. При уменьшении фронта горных работ воронка депрессии уменьшается, при расширении, а также при углублении — увеличивается и особенно быстро достигает значительных размеров (свыше 30 *км*) при наличии трещиноватых и закарстованных водоносных горизонтов. Развитие депрессионной воронки в напорных водоносных горизонтах при откачках происходит значительно быстрее.

Значительные притоки, вплоть до катастрофических, могут произойти при подходе выработок к старым выработанным участкам

и «гореликам». Поэтому в целях предотвращения подобных аварийных случаев нужно постоянно сопоставлять положение старых выработок (по маркшейдерским планам) и выгоревших участков с вновь проектируемыми и в нужных местах оставлять предохранительные целики, размеры которых определяются расчетами или же устанавливаются по аналогии с действующими шахтами.

Установление изменения водопритока по временам года и на разных участках шахтного поля позволяет выявить связь шахтных вод с атмосферными и поверхностными водотоками и водоемами, выявить роль отдельных водоносных горизонтов в обводнении выработок, участки с наиболее благоприятными условиями для поступления подземных вод в выработки и соответственно этому принимать наиболее рациональные решения по борьбе с водопритоками.

Изучение режима шахтных вод позволяет решать крупные теоретические проблемы — познавать условия формирования подземных вод и изучать общий баланс этих вод, что является основными задачами теоретической гидрогеологии.

Изучение режима шахтных вод должно проводиться комплексно, т. е. наблюдения следует вести не только в горных выработках, но и в специально оборудованных скважинах стационарной сети, закладываемых в наиболее характерных пунктах на большой площади еще до начала горных работ. Результаты комплексного изучения режима шахтных вод позволяют наиболее обоснованно решать различные практические задачи (помимо общетеоретических), определять эффективность осуществленных средств водоотлива и принятых дренажных мероприятий, а также вносить необходимые коррективы в способы борьбы с притоками.

§ 95. Определение водопритоков в горные выработки

Как указывалось, прогноз притока подземных вод к различного рода горным выработкам в процессе эксплуатации — одна из сложнейших проблем гидрогеологии месторождений твердых полезных ископаемых, что обусловливается сочетанием разнообразных природных и искусственных факторов, изменяющихся во времени и пространстве.

В зависимости от гидрогеологических условий и наличия соответствующих исходных данных в настоящее время для определения ожидаемого притока воды используют следующие методы: гидрогеологических аналогий, водного баланса, моделирования и аналитический. Часто оценку водопритоков выполняют различными методами.

Определение водопритоков по гидрогеологическим аналогиям. Этот способ основан на сопоставлении гидрогеологических условий вновь проектируемой шахты или рудника и уже действующей (или действовавшей) и, если геологическое строение и гидрогеологические условия сходны, для новой шахты принимаются притоки, наблюдавшиеся на старой. Этот

способ является приближенным в силу того, что в природе полной аналогии геологического строения и гидрогеологических условий даже для близ расположенных месторождений не наблюдается. Для издавна разрабатываемых месторождений (Урала, Алтая, Караганды, Донбасса и др.) этот способ дает вполне удовлетворительные результаты.

Эмпирически установленная количественная зависимость по методу аналогий приближенно выражается следующей формулой:

$$Q = Q_1 \cdot \frac{F}{F_1} \cdot \left(\frac{H}{H_1}\right)^n, \qquad (73)$$

где Q — ожидаемый приток;

Q_1 — фактический приток по смежно действующей шахте;

F — площадь осваиваемого шахтного (рудного) поля;

F_1 — площадь действующего шахтного поля;

H — средневзвешенная величина понижения уровня подземных вод на вновь осваиваемом рудном поле;

H_1 — фактическая средневзвешенная величина понижения уровня на действующем руднике;

n — показатель степени, изменяющийся от 1/2 до 1; чаще $n = 1$.

Определение водопритока по коэффициенту водообильности является разновидностью предыдущего способа. Как уже указывалось, коэффициент водообильности представляет собой отношение количества откачанной воды в кубометрах к количеству вынутого полезного ископаемого в тоннах за тот же период времени. Коэффициент водообильности зависит как от естественных факторов, которые для данной шахты более или менее стабильны, так и искусственных, являющихся переменными. В частности, он может сильно меняться в зависимости от системы разработки, интенсивности ведения эксплуатационных работ и их масштаба. Оснащенность современных шахт высокопроизводительными машинами позволяет вести горные работы форсированно, что уменьшает коэффициент водообильности. В соответствии с этим для новых шахт принимается приток, наблюдаемый на старых шахтах, условия которых аналогичны, но вносится поправка на новую систему работ, применение которых обеспечивает более интенсивную добычу полезного ископаемого.

Определение водопритока по водному балансу. В начальный период работы шахты притоки несколько больше, чем в дальнейшем. Это обусловливается тем, что вначале в горные выработки поступают не только динамические запасы (естественные ресурсы), но и статические (естественные запасы), срабатываемые в пределах депрессионной воронки. При определении водопритоков по водному балансу основной задачей является установление динамических ресурсов, т. е. того количества воды, которое будет поступать в выработки за счет постоянных источников питания: инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных вод, притока из других водоносных горизонтов и т. п.

Более или менее точно динамические притоки можно определить по коэффициенту, или модулю, подземного стока. Зная величину модуля подземного стока и водосборную площадь, с которой в выработки притекает подземная вода, можно ориентировочно определить возможный приток воды в горные выработки шахты.

Определение притоков воды по водному балансу возможно только для месторождений, залегающих неглубоко от поверхности, для которых нетрудно определить исходные данные: коэффициент и модуль подземного стока и водосборную площадь, откуда ожидается пополнение подземных вод, поступающих в горные выработки.

Метод моделирования применяется при сложных контурах горных выработок и является относительно точным при условии, если гидрогеологические параметры установлены более или менее достоверно. В исследовательских и проектных организациях наибольшее применение получил метод электродинамических аналогий — ЭГДА, предложенный Н. Н. Павловским, с помощью которого решаются плоские и пространственные задачи. Метод основан на аналогии между установившейся фильтрацией жидкости и течением электрического тока. Наличие электродинамической аналогии позволяет решать ряд задач по определению водопритоков в условиях установившегося и неустановившегося движения при любых контурах водоносности и областей питания и при любом расположении горных выработок в плане и пространстве. Для этой цели используются электродинамические и электрические модели, воспроизводящие натурные условия.

Сложные задачи фильтрации решаются на сеточных электроинтеграторах, иногда совместно с установкой ЭГДА. Широко используются также методы гидравлических аналогий. На гидроинтеграторе В. С. Лукьянова исследуются вопросы неустановившегося движения подземных вод, продолжительность времени осушения, распространение во времени депрессионной воронки, изменение притоков во времени и т. п.

Аналитические методы. В этих методах используются формулы динамики подземных вод. Как уже указывалось, из-за сложного сочетания разнообразных природных и искусственных факторов, обусловливающих тот или иной характер водопритоков в горные выработки, точные теории расчета водопритоков пока еще не разработаны. Существуют различные аналитические методы подсчета притоков, учитывающие с большей или меньшей степенью достоверности эти факторы. Подробно аналитические методики подсчета водопритоков излагаются в специальных руководствах [1, 2, 18, 45 и др.].

Необходимо только помнить, что хотя и существует множество расчетных гидрогеологических схем и формул, тем не менее они не исчерпывают всего многообразия гидрогеологических условий, существующих в натуре. Это и заставляет в каждом конкретном случае подходить к решению поставленной задачи по осушению проектируемого к разработке месторождения творчески, с полным

учетом всех факторов, обусловливающих степень и характер обводненности как всего месторождения в целом, так и отдельных его участков и соответственно этому применять наиболее приемлемые способы расчета, или разрабатывать некоторые частные решения, видоизменения, существующие формулы и способы расчета.

ГЛАВА XXIII

МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ПОДЗЕМНЫМИ И ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОДАМИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

§ 96. Общие положения

Огромный размах развития горнорудной промышленности в нашей стране обусловливает строительство многочисленных новых шахт, рудников и карьеров в самых разнообразных природных условиях.

Нормальное ведение вскрышных и очистных работ на месторождениях со сложными и очень сложными гидрогеологическими условиями невозможно без планового осуществления дренажных мероприятий. Заботы партии и правительства об улучшении условий труда рабочих горной промышленности, все возрастающая механизация и автоматизация горных предприятий, перевод в недалеком будущем работы горных механизмов на полностью автоматизированное обслуживание требуют дальнейшего совершенствования методов осушения разрабатываемых месторождений полезных ископаемых, даже находящихся в сравнительно простых гидрогеологических условиях.

Многообразие геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических условий (последнее имеет особо существенное значение при ведении горных работ открытым способом) обусловливает и многообразие способов осушения при разработке различных месторождений твердых полезных ископаемых.

§ 97. Значение гидрогеологических данных для размещения горных выработок

Для разработки генерального плана освоения месторождения основой служат материалы геологоразведочных работ, включающие и гидрогеологические исследования. На месторождениях, приуроченных к закарстованным породам, и в районах многолетнемерзлых пород разработку месторождения следует начинать на участках, максимально удаленных от речных долин.

С. В. Троянский, Л. Н. Смирнов, П. П. Климентов и другие рекомендуют сильно обводненные месторождения разрабатывать

одновременно несколькими шахтными полями. Одновременный водоотлив из нескольких шахт способствует образованию одной крупной депрессионной воронки, что нередко значительно снижает стоимость дренажных мероприятий по каждой отдельно взятой шахте, а тем самым и стоимость добываемого рудного сырья. Существенное значение имеет также упорядочение поверхностного стока в пределах шахтных полей: проведение нагорных канав, отвод поверхностных водотоков за пределы шахтных полей и т. п.

Если месторождение крупное и расположено в различных геоморфологических условиях (по долинам рек, на водоразделах и т. п.), то в первую очередь целесообразнее отрабатывать водораздельные участки, относительно менее обводненные, а затем уже поля, расположенные вблизи водотоков и водоемов.

§ 98. Защита горных выработок от поверхностных вод

Изоляция горных выработок от поверхностных вод чаще всего осуществляется тем, что под прудами, озерами, долинами рек оставляются охранные целики, и это влечет за собой потерю полезного ископаемого. Более прогрессивным следует считать отвод речек в новое русло, экранирование ложа рек глиной и бетоном, тампонаж и цементацию трещин.

Вообще борьбе с проникновением поверхностных вод нужно всегда уделять должное внимание. По данным С. В. Троянского, примерное сезонное увеличение притоков, которое следует считать более или менее нормальным, для месторождений геосинклинального типа не должно превышать 50%, для платформенных 20—25% и лишь для карстовых областей оно может достигать 300%. В действительности же на некоторых месторождениях весной притоки увеличиваются на 1000% и более, что нередко вызывает приостановку работ.

В необходимых случаях проводят планировочные работы на поверхности, устраивают нагорные канавы, лотки и т. п. для отвода поверхностного стока за пределы контура депрессионных воронок. В случае неорганизованного сброса рудничных вод последние фильтруются в толщу горных пород и могут достигать горных выработок. По данным И. А. Бабокина, на некоторых шахтах Подмосковного бассейна до 50% сбросовых шахтных вод фильтровалось в породы в пределах шахтных полей.

§ 99. Специальные методы проходки шахтных стволов

Специальные методы проходки шахтных стволов применяют при наличии в вскрываемых породах водонасыщенных песков, особенно мелко- и тонкозернистых, которым присущи плывунные свойства, а также закарстованных и трещиноватых обводненных пород. Плывуны вносят значительные осложнения при ведении горных работ. Имеются многочисленные способы борьбы с плывунами, с успехом применяемые при проходке вертикальных и горизонтальных

подземных выработок, а также при отрывке котлованов, карьеров и выемок.

При проходке стволов шахт применяют: забивную крепь; опускную крепь; кессонный способ; вибрацию; химические способы закрепления плывунов; искусственное замораживание; шахтобурение; предварительное (опережающее) понижение уровня подземных вод; тампонирование.

Возможность и экономическая целесообразность применения того или иного способа устанавливаются в каждом конкретном случае в соответствии с условиями залегания месторождения полезного ископаемого, определяющими способ его вскрытия и эксплуатации. Окончательный выбор способа производится исходя из технико-экономических соображений.

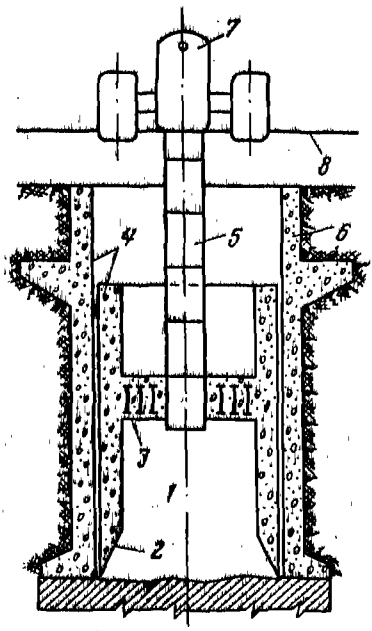


Рис. 86. Схема кессона

1 — рабочая камера; *2* — башмак; *3* — потолок рабочей камеры; *4* — шахтная крепь; *5* — труба; *6* — форшахта; *7* — шлюзовый аппарат; *8* — приемная площадка

Забивная крепь. При мощности плывуна до 2—5 *м* и при гидростатическом давлении, не превышающем 1,5 *ат*, а также при наличии почвы, в которую могут быть забиты шпунтины, с успехом можно применять косую забивную крепь. При мощности плывуна 8—10 *м*, залегании его на глубине до 30 *м* при указанном гидростатическом давлении и подстилании плывуна водонепроницаемыми глинистыми породами может быть применена прямая забивная деревянная, металлическая или железобетонная крепь.

Опускная крепь. При мощности плывуна до 10—15 *м*, гидростатическом давлении до 1,6—1,8 *ат* и отсутствии твердых прослойков породы и валунов применяется опускная крепь при условии, что глубина погружения и длина трущихся о породу стенок крепи не превышает 20—30 *м*.

Кессонный способ. Применение сжатого воздуха в строительной технике — наиболее старое средство для производства работ ниже уровня воды. Суть этого способа заключается в следующем (рис. 86). В герметически закрытую так называемую *рабочую камеру* с открытым дном нагнетается воздух, который отжимает воду в забое камеры. Нагнетают воздух под давлением, достаточным для преодоления сопротивления водяного столба подземных вод вне камеры кессона, что исключает возможность поступления воды в камеру через ее открытое дно. Одновременно с углубкой на поверхности наращивается крепь шахтного ствола и по мере выемки песка

из-под «ножа» рабочая камера с нарощенной крепью опускается.

Кессонный способ дает полную гарантию проходки стволов шахт в оплывающих породах (плывунах) без всякого ослабления грунтов под соседними наземными зданиями и сооружениями, что исключает их деформацию.

Вибрация. Колебания систем с малыми амплитудами и периодами называются вибрациями. При действии вибрации на несвязные раздельнозернистые породы частицы, слагающие породу, уплотняются и принимают более устойчивое положение; внутреннее трение при этом значительно увеличивается. Уплотнение песчаных пород методом вибрации достигается только при вибрировании с относительно небольшой амплитудой колебания, но высокой частотой. В противном случае (большая амплитуда и относительно низкая частота) водонасыщенные пески разжижаются. При проходке стволов шахт методом вибрации используются оба эти свойства мелкозернистых песков — разжижение и уплотнение.

Проходка путем разжижения. Разжижение плывунов при вибрировании облегчает погружение опускной крепи, которая «тонет» в разжиженном плывуне как в тяжелой вязкой жидкости. Это и дает возможность опустить крепь при помощи вибрирования на подстилающий плывун плотные породы. Опускная вибрационная крепь изолирует внутришахтный объем плывуна от остальной его массы и тем самым позволяет выдать его на поверхность без всяких затруднений.

Проходка путем уплотнения. Свойство плывунов уплотняться при вибрировании дает возможность проходить в них как вертикальные, так и наклонные и горизонтальные выработки. Для проходки вертикальных шахт плывун (по достижении его поверхности) вибрированием уплотняют на некоторую глубину. Проходка ствола в уплотненной зоне плывунов ведется как в обычной устойчивой породе. Выемка уплотненного плывуна осуществляется таким образом, чтобы всегда оставался некоторый защитный слой уплотненного песка вне выработки. В зависимости от мощности плывуна может потребоваться несколько заходок для его вибрационного уплотнения.

При проходке наклонных и горизонтальных выработок применяется следующая схема работ. Определяется необходимая ширина полосы плывуна для его уплотнения, достаточная для проходки выработки и защиты от прорыва плывуна в забой. На установленной таким путем площади бурят в шахматном порядке скважины, в них спускают вибрационные машины, с помощью которых и уплотняют намеченный объем плывуна, после чего проходка осуществляется без затруднений.

Уплотненный при помощи вибрации водонасыщенный песок остается в плотном состоянии неопределенно долгое время.

Химические способы закрепления плывунов. Сущность химических методов сводится к превращению неустойчивой водонасыщенной толщи песков в плотную водоупорную

массу. Достигается это двумя способами: двухрастворным и однорастворным. При двухрастворном способе в пески нагнетается под некоторым давлением вначале раствор жидкого стекла, а затем хлористого кальция; при взаимодействии этих растворов в порах песка выпадает гидрогель кремнезема, быстро твердеющий и цементирующий толщу песков в плотную водонепроницаемую массу с прочностью до 20—60 *кГ/см*². Двухрастворный способ силикатизации дает наилучшие результаты при химическом закреплении песков с коэффициентом фильтрации 5—30 *м/сутки*.

Для закрепления слабо водопроницаемых водонасыщенных пород с коэффициентом фильтрации менее 5 *м/сутки* применяются однорастворные способы, для чего нагнетаются слабо вязкие, но быстро твердеющие в порах пород растворы. Из однорастворных способов весьма эффективным является смолизация. При обработке водонасыщенных неустойчивых пород синтетическими смолами им придается весьма высокая механическая прочность (до 50—100 *кГ/см*²) и водонепроницаемость.

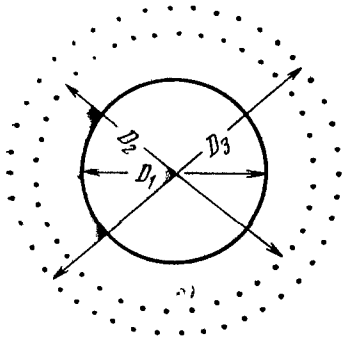


Рис. 87. Схема расположения замораживающих скважин вокруг ствола шахты:

D_1 — диаметр ствола шахты; D_2 — диаметр внутреннего кольца замораживающих скважин; D_3 — диаметр внешнего кольца замораживающих скважин

И с к у с с т в е н н о е з а м о р а ж и в а н и е. Область применения способа замораживания почти не ограничивается никакими техническими и геолого-гидрогеологическими условиями. Выбор между ним и другими какими-либо специальными способами определяется исключительно технико-экономическими соображениями.

При помощи замораживания можно с успехом проходить любые горные выработки (вертикальные, наклонные, горизонтальные) в самых разнообразных породах: глинах, плывунах, скальных трещиноватых и закарстованных известняках значительной мощности. Этот способ можно также использовать для создания мерзлотных завес вокруг части месторождения, котлована, карьера, при строительстве наземных и подземных сооружений. Для создания промороженного цилиндрического слоя вокруг запроектированного ствола шахты (рис. 87) на определенных расстояниях (согласно специальному расчету) бурят скважины на всю мощность плывунов или других водонасыщенных пород. В пробуренных скважинах создается замкнутая непрерывная циркуляция охлажденных растворов. Число замораживающих скважин в зависимости от диаметра и глубины шахты изменяется от 20 до 100 и более, а общий метраж замораживающих скважин достигает иногда 10 000 *м*.

Для замораживания горных пород применяют концентрированные рассолы хлористого натрия, кальция или магния; чаще всего

используется раствор хлористого кальция, который замерзает при температуре минус 34° С. Охлаждение концентрированных рассолов производят в специальных аммиачных компрессорных холодильных установках.

Способ искусственного замораживания с большим успехом применяется при строительстве шахт в Донбассе, Караганде, Подмосковном бассейне, в Западной Украине и других местах. На создание замороженной цилиндрической стенки вокруг ствола шахты обычно требуется от двух до шести месяцев в зависимости от свойств пород и гидрогеологических условий. Столь значительная затрата времени является существенным недостатком этого способа закрепления плывунов и вообще слабых пород.

Шахтобурение. Способ проходки стволов шахт бурением известен давно и усовершенствован Г. И. Маньковским и его сотрудниками. В настоящее время этот способ с успехом применяется при проходке стволов полного диаметра в слабых неустойчивых породах, а также в крепких сильно обводненных.

Устойчивость стенок шахты в процессе проходки достигается нагнетанием глинистого раствора соответствующей консистенции. Глинистый раствор, закрепляющий стенки шахты, препятствует также поступлению в нее подземных вод из вскрываемых водоносных горизонтов.

По окончании расширения ствола стенки его закрепляют при помощи металлической кольцевой крепи или тюбингов с бетонным днищем и режущими краями. Собираемая на поверхности крепь медленно опускается в глинистый раствор, заполняющий пробуренный ствол.

Этот прогрессивный способ не получил еще широкого применения, бурение шахтных стволов в Подмосковном и Челябинском бассейнах, на строительстве Московского метрополитена и в других местах дало хорошие результаты.

Предварительное (опережающее) понижение уровня подземных вод. Этот метод с наибольшим успехом применяется при проходке стволов шахт и горизонтальных горных выработок при наличии водоносных пород с коэффициентом фильтрации более 5 *м/сутки*.

Предварительное, или опережающее, водопонижение часто осуществляется при проходке стволов шахт при помощи так называемой *контурной водопонизительной установки*. Суть ее состоит в том, что вблизи ствола шахты по кольцу (рис. 88) в соответствии со специальным гидрогеологическим расчетом бурятся водопонижающие скважины, в которые опускаются глубинные насосы и производится откачка воды. Образующиеся вокруг каждой скважины депрессионные воронки пересекаются, водоносные породы в пределах воронки депрессии осушаются и тем самым проходка ствола шахты и околоствольных выработок в осушенных породах ведется без затруднений.

Дренажная скважина-фильтр, пройденная в центре ствола шахты (см. рис. 88), служит для спуска в толщу известняков воды,

накапливающейся при проходке ствола в забое. Она имеет следующую конструкцию фильтра. Еще до проходки ствола в его центре бурится скважина до нужной глубины; затем в интервале залегания известняков в скважину засыпается гравий, а выше, до отметки уровня воды в первом водоносном горизонте — крупнозернистый

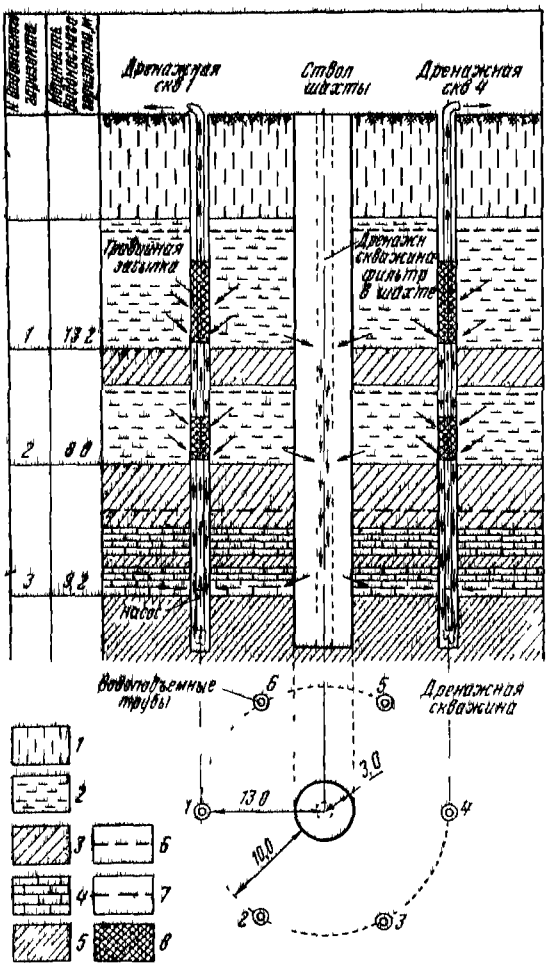


Рис. 88. Схема дренажа подземных вод водопонижающими скважинами при проходке ствола шахты

1 — суглинок; *2* — песок мелкозернистый; *3* — глина песчаная; *4* — известняк; *5* — глина; *6* — уровень безнапорных вод; *7* — уровень напорных вод; *8* — фильтры в водопонижающих скважинах; стрелками показано направление движения подземных вод в осушаемых пластах

отсортированный песок. Одновременно с засыпкой гравия и песка обсадные трубы извлекаются. Подобное устройство скважины-фильтра не препятствует углубке ствола шахты.

Способ предварительного водопонижения благодаря совершенствованию технических средств глубинного водоотлива из скважин (применение высокопроизводительных глубинных насосов) очень широко применяется при проходке шахтных стволов и околоствольных выработок. Наилучшие результаты достигаются при откачке

из крупно- и среднезернистых песков, а также из трещиноватых и закарстованных пород. Преимущества предварительного водопонижения заключаются также и в том, что при этом не требуется затрат большого количества материалов и сложного оборудования, а дренажный эффект достигается в относительно короткие сроки.

Предварительное водопонижение для проходки шахтных стволов с успехом применялось в Подмосковном, Кузнецком, Карагандинском бассейнах, на Ленских золотых приисках и на других месторождениях.

Тампонирование применяется для уменьшения водопритоков в ствол шахты при проходке водоносных трещиноватых скальных и полускальных, а также закарстованных пород. Сущность метода сводится к заполнению трещин и других пустот в горных породах непроницаемым для воды материалом, нагнетаемым через скважины, вскрывшие водоносные участки. Для тампонирования применяются различные тампонажные материалы: глинистые, цементно-глинистые с пластифицирующими добавками, цементные, горячий битум и холодные битумные эмульсии. Тампонирующие растворы нагнетаются в породы под давлением, превышающим гидростатическое давление подземных вод, циркулирующих в трещинах. В результате заполнения трещин и других пустот тампонирующим материалом вокруг ствола шахты образуется водонепроницаемая завеса, под защитой которой и осуществляются проходческие работы. Применение того или иного материала для тампонажа зависит от конкретных гидрогеологических особенностей участка строительства шахты и устанавливается по технико-экономическим показателям.

В Донбассе в порядке эксперимента при проходке ствола шахты в плывунах применялось электроплавление — нагрев плывунов до температуры 1700—1750° С, при которой происходит плавление частиц плывуна и после охлаждения вокруг проектируемого ствола образуется сплошной сплавленный монолит цилиндрической формы. Временное сопротивление сжатию обработанного электроплавлением плывуна составляет 280—430 *кГ/см²*, водопроницаемость практически равна нулю. Экспериментальные данные, полученные в производственных условиях, показали, что расход электроэнергии при электроплавлении не выше, чем при замораживании и кессоном способе, а продолжительность подготовительных работ и самого процесса электроплавления значительно меньше.

§ 100. Способы осушения месторождений в процессе эксплуатации

Как уже указывалось, схему осушения месторождения необходимо составлять с учетом гидрогеологических особенностей конкретного шахтного поля и тесно увязывать с проектом развития горных работ. Так, в период проведения подготовительных выработок, когда кровля сохраняется в естественном состоянии, нередко

можно ограничиться заложением минимального количества дренажных точек. При ведении очистных работ дренажная сеть получает максимальное развитие и должна опережать выемочные работы. К последним приступают после того, когда воронка депрессии на данном участке достигает размеров, обеспечивающих гарантию от внезапных катастрофических прорывов подземных вод.

На месторождениях, где водонасыщенные пласты обладают низкой водопроницаемостью и слабой водоотдачей, дренажная сеть на месторождении закладывается за год-два до начала очистных работ с целью возможно полного осушения пород кровли и снижения напоров воды в почве до пределов, исключающих возможность прорывов воды. Этим самым будут созданы условия, в наибольшей степени гарантирующие безопасность ведения горных работ.

В настоящее время применяются три способа осушения шахтных полей: поверхностный, подземный и комбинированный. Во времени способы осушения подразделяются на предварительные и параллельные. Предварительное осушение осуществляется тремя указанными способами. Поверхностный способ сводится к бурению водопонижающих (на подпродуктивный водоносный горизонт) и водопоглощающих (надпродуктивный водоносный горизонт) скважин; водопоглощающие скважины служат для сбрасывания воды из обводненной надпродуктивной толщи в подпродуктивный водоносный горизонт, из которого откачка осуществляется из водопонижающих скважин. При поверхностном способе осушения можно в сравнительно короткие сроки обеспечить безопасные условия для проведения горных выработок. Поверхностный способ осушения дает наибольший эффект при большой мощности и хорошей водопроницаемости водоносных горизонтов; в безнапорных горизонтах при значении коэффициента фильтрации более 3 *м/сутки* и в напорных — более 0,5 *м/сутки* и в условиях высоких напоров. Поверхностный способ благодаря оперативности наиболее полно отвечает целям предварительного осушения. Существенным его недостатком является необходимость одновременной работы многих дренажных скважин.

Подземный способ осушения осуществляется путем проходки специальных дренажных подземных выработок (штреков, уклонов и т. п.), расположенных в нижней части пласта полезного ископаемого, в которых затем устанавливают в кровлю и почву забивные и сквозные фильтры, трубчатые колодцы, а чаще их комбинации. Эти установки и являются основными дренажными устройствами, для которых и проходят подземные горные выработки. Подземный способ осушения в целом весьма надежен и эффективен при любых гидрогеологических условиях, особенно при дренировании песков с незначительной водопроницаемостью (до 3 *м/сутки*). Существенными недостатками этого способа являются трудоемкость и длительность (3—5 лет) его осуществления, а также необходимость поддержания в течение долгого времени большого числа дренажных горных выработок. Недостатком подземного способа осушения является также возможная опасность прорыва подземных вод из под-

продуктивного водоносного горизонта. В большинстве случаев при напорах более 20—25 *м* проведение дренажных штреков становится опасным. В таких случаях напорные уровни снижаются до нужных отметок с помощью водопонизительных скважин, т. е. применяется комбинированный способ осушения.

Комбинированный способ сочетает в себе оба указанных способа; часть воды из дренируемых водоносных горизонтов откачивается с помощью скважин, а другая поступает в подземные дренажные выработки через забивные фильтры и другие дренажные устройства и затем откачивается на поверхность. Осушение по комбинированному способу проводят в два этапа. Вначале предварительно понижают напоры или уровни подземных вод водопонижающими или водопоглощающими скважинами, под защитой которых проходят дренажные и подготовительные выработки. На втором этапе вступает в действие подземный способ: при помощи сквозных, забивных фильтров и других дренажных устройств срабатываются остаточные напоры в подпродуктивных водоносных горизонтах и осушается надпродуктивная толща. Важнейшим преимуществом комбинированного способа является маневренность осушения и возможность обеспечения строительства шахт в сжатые сроки, что и обусловило его широкое применение при разработке месторождений в сложных гидрогеологических условиях.

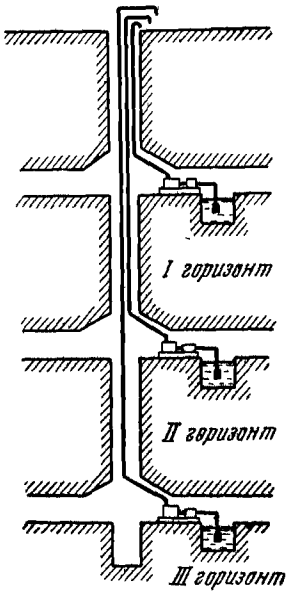


Рис. 89. Схема непосредственного водоотлива с трех горизонтов

Практика показала, что для дренирования месторождений, разрабатываемых подземным способом, используются только подземный и комбинированный способы, а при разработке открытым способом — все три. Но наилучшим способом осушения будет тот, который в наибольшей степени учитывает своеобразие природных особенностей конкретного месторождения.

При подземном и комбинированном способах осушения применяют следующие средства водоотлива и дренажные устройства: шахтный водоотлив; предварительное осушение с поверхности; забивные фильтры; сквозные фильтры; водопонижающие колодцы и скважины; опережающие выработки и предохранительные перемычки.

Шахтный водоотлив является одним из способов борьбы с отрицательным влиянием подземных вод на ведение горных работ, хотя и пассивным. Подземная вода, поступающая в горные выработки, через систему канав и труб поступает в центральный водосборник, откуда насосными установками выдается на поверхность

через шахтные стволы. В зависимости от общего количества воды, поступающей в рудник (шахту), применяются различные схемы водоотливных установок (рис. 89). Шахтный водоотлив является основным средством борьбы с подземными водами в горных выработках при несложных гидрогеологических условиях. При сложных гидрогеологических условиях он применяется в комбинации с другими способами.

В случае неглубокого залегания полезного ископаемого (до 120 *м*) шахтный водоотлив осуществляется следующим экономи-

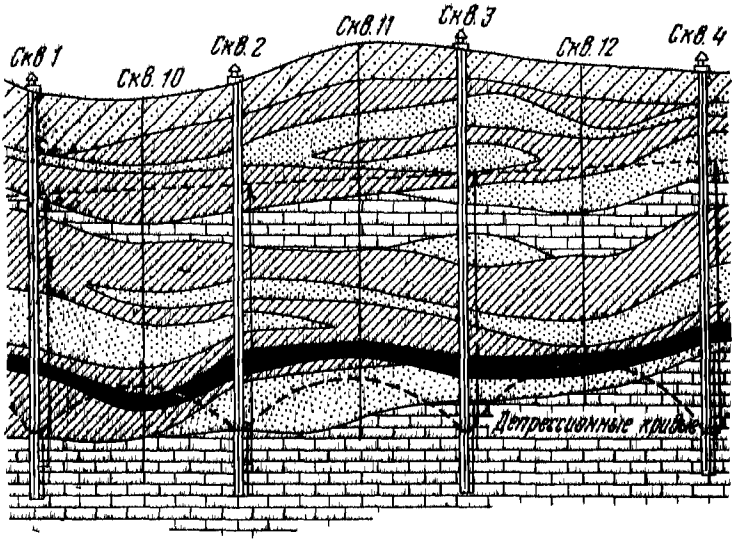


Рис. 90. Депрессионные воронки при осушении взаимодействующими скважинами

скв. 1, 2, 3 и 4 — водопонижающие; скв. 10, 11 и 12 — разведочные; пунктир — депрессионные кривые

чески выгодным способом. На разрабатываемом участке на расстоянии нескольких сотен метров от шахтного ствола сооружается участковый *водосборник* (и насосная установка), вблизи него с поверхности проходится скважина, в которую устанавливается колонна водоподъемных труб; по ним шахтные воды и откачиваются на поверхность.

Предварительное осушение с поверхности сводится к следующему. На шахтном поле (или группе шахтных полей, что дает еще больший эффект) в соответствии с гидрогеологическим расчетом закладываются водопонизительные скважины, оборудуемые глубинными насосами. В результате длительных откачек из системы взаимодействующих скважин создается общая районная воронка депрессии (рис. 90), в пределах которой проходка подготовительных выработок и очистные работы осуществляются без помех.

Забивные фильтры. Осушение горных выработок при помощи забивных фильтров нашло весьма широкое применение и для многих месторождений является почти единственным способом, с помощью которого можно вести добычу полезного ископаемого. Забивные фильтры (рис. 91) представляет собой короткие (1—1,5 *м*) перфорированные трубы (диаметр перфорации обычно 2—3 *мм*) диаметром 25—63 *мм*, навинченные на глухие трубы и устанавливаемые в кровле штрека. Общая длина забивного фильтра достигает 12—15 *м*. При помощи такого забивного фильтра вода из надпродуктивных песков самотеком поступает в штрек, затем в центральный водосборник и оттуда откачивается на поверхность. Фильтры забивают в кровлю на расстоянии 5—25 *м*, иногда гуще, иногда реже. Их можно забивать также в почву, стенки и забой горизонтальных выработок и по ним вода из напорного подпродуктивного водоносного горизонта самоизливом поступает в штрек, что обеспечивает иногда снижение напоров до безопасной величины.

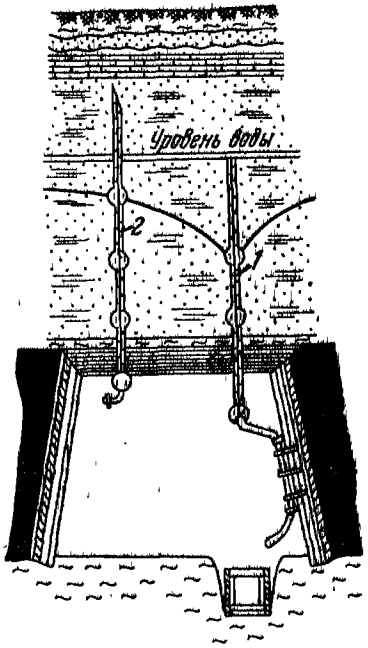


Рис. 91. Схема забивного фильтра (*1*) и аэрирующей скважины (*2*)

Дебит забивных фильтров даже на площади одного шахтного поля колеблется в широких пределах, от долей до 7 *м*³/*ч* и более. Продолжительность работы забивных фильтров колеблется от одного-двух до 9—12 месяцев.

При дренировании водоносного пласта системой забивных фильтров в нем создается разрежение, что приводит к резкому уменьшению производительности забивных фильтров. Такое явление обычно наблюдается при наличии в кровле водоносного пласта глинистых воздухонепроницаемых слоев; поступлению воздуха снизу препятствует обводненная часть песков, плохо проницаемая для воздуха. В целях устранения разрежения устраивают так называемые **аэрирующие скважины**, которые устанавливают вблизи забивных фильтров на расстоянии 100—150 *м* одна от другой.

Для интенсификации процесса осушения мелко- и тонкозернистых песков через аэрирующие скважины нагнетается воздух, для чего они подключаются к шахтному трубопроводу сжатого воздуха. Поступающий в осушаемый пласт сжатый воздух создает дополнительное давление на поверхность водоносного горизонта, что влечет за собой увеличение дебита забивных

фильтров в 2—3 раза при повышении давления в пласте на 1,5—2 *атм*.

Вакуум-фильтры. При помощи несложных приспособлений вокруг водоприемной части забивного фильтра, посаженного в кровлю выработки, можно создать разрежение, что обусловливает значительно более интенсивное (в 2—3 раза) поступление воды из осушаемых песков в фильтр. Подобные фильтры получили наименование вакуум-фильтров (рис. 92). Сроки осушения при помощи вакуум-фильтров сокращаются в 2—3 раза. При установке вакуум-фильтров необходимо, чтобы над ними всегда находился столб воды, иначе они разрядятся и будут действовать как обычные фильтры.

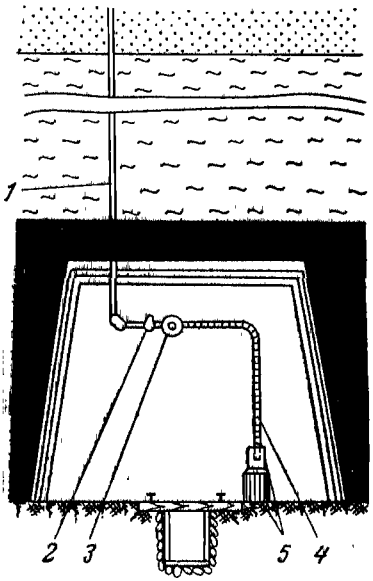


Рис. 92. Схема забивного вакуум-фильтра

1 — глухой патрубок; *2* — манометр; *3* — кран; *4* — резиновый шланг; *5* — сосуды с водой

Когда фильтры перестают действовать, их извлекают, а отверстия тщательно тампонируют. После прочистки этот же фильтр используют в другом месте.

При проектировании осушения месторождения забивными фильтрами предварительно проводится гидрогеологический расчет, причем вся система фильтров, устанавливаемых в штреках шахты, принимается за систему взаимодействующих колодцев и расчеты ведутся по формулам взаимодействующих скважин.

Сквозные фильтры. При наличии в надпродуктивной толще нескольких водоносных горизонтов или же когда водоносные пески отделены от кровли штрека мощным пластом (более 15 *м*) глин, устраиваются сквозные фильтры (рис. 93). Последние представляют собой скважины, пройденные в поверхности до кровли штрека, оборудованные фильтрами, чаще всего гравийными. Сквозные фильтры устанавливаются на расстоянии 100—200 *м* друг от друга; дебит их может доходить до 100—180 $м^3/ч$.

Для создания вакуума в сквозном фильтре в устье скважины опускается труба, соединенная с вакуум-насосом, при помощи которого отсасывается воздух из сквозного фильтра. Устье скважины герметически закрывается, а нижняя часть оборудуется краном, позволяющим оставлять в скважине некоторый столб воды. Вакуум может быть создан и более простым способом. Для этого верхняя часть фильтра герметически закрывается пробкой, а нижняя погружается в сосуд с водой, создавая тем самым гидравлический затвор.

что предотвращает поступление воздуха снизу. При регулировании спуска воды из фильтра в нем создается вакуум, что увеличивает эффект осушения.

Водопонижающие колодцы и скважины. Их устраивают в почве штреков в том случае, если при помощи только забивных фильтров не удается снизить напор воды в подпродуктивных песках до нужных отметок. При глубине колодцев до 3 *м* последние устраивают шахтного типа, при большой глубине — скважины диаметром

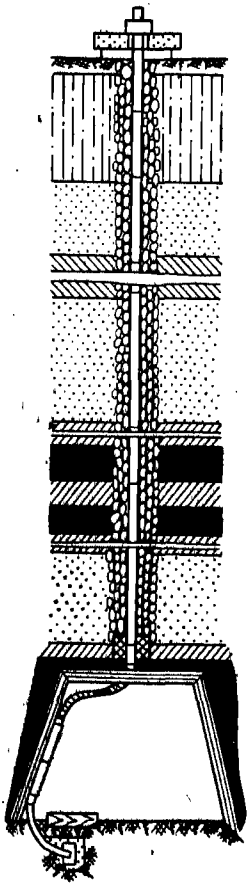


Рис. 93. Схема сквозного фильтра, дренирующего три водоносных горизонта

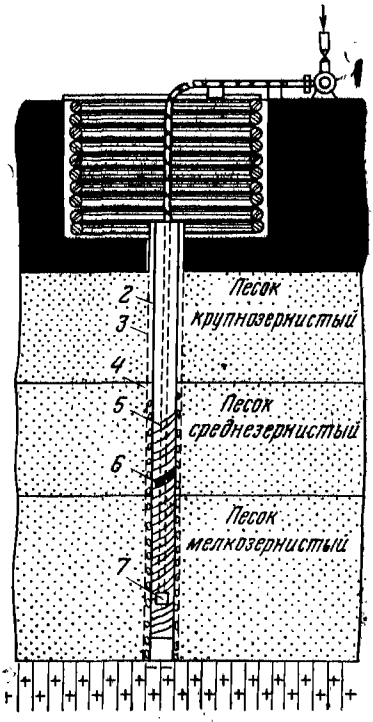


Рис. 94. Водопонижающая скважина

1 — насос; *2* — обсадные трубы; *3* — извлекаемые обсадные трубы; *4* — гравийная обсыпка; *5* — всасывающий шланг; *6* — проволочная обмотка захватной части фильтра; *7* — храпок всасывающего шланга

200—300 *мм* с целью установки гравийного фильтра (рис. 94). В понижающие колодцы и скважины опускаются насосы и откачка воды из них ведется непрерывно в течение всего периода работы на данном участке. Водопонижающие колодцы и скважины рекомендуется закладывать на пониженных участках; при этом глубина их будет наименьшей, а радиус влияния — наибольшим.

В результате откачек вокруг колодцев создаются пересекающиеся воронки депрессии, что и обеспечивает нужное снижение напоров. Расчет понижающих колодцев ведется по формулам взаимодействующих скважин.

Дренажные штреки. Они служат для сбора воды, поступающей из забивных и сквозных фильтров и для закладки водопонижающих колодцев и скважин. Проходятся штреки ниже всех водоносных горизонтов (обычно в нижней части разрабатываемого пласта). Одновременно дренажные штреки непосредственно сами осушают расположенные поблизости водоносные горизонты.

Поглощающие скважины. На некоторых месторождениях естественные уровни воды в подпродуктивных песках или

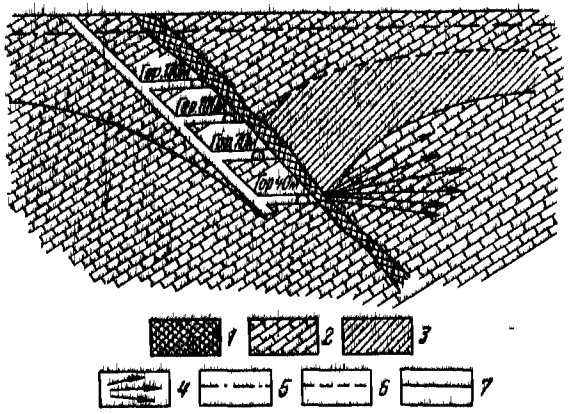


Рис. 95. Схема осушения закарстованных известняков опережающими скважинами (по Н. Ф. Унковской и Н. Ф. Соколову)

1 — рудоносный пласт; *2* — известняки; *3* — осушенная зона известняков; *4* — водоспускные скважины; *5* — статический уровень подземных вод; *6* — уровень до осушения с горизонта 40 *м*; *7* — уровень после осушения

известняках (а чаще в результате откачки из них воды) залегают на более низких отметках, чем почва горных выработок. При таких условиях вода из надпродуктивных водоносных горизонтов, а также из горных выработок может быть спущена по водопоглощающим скважинам в подпродуктивные пески или известняки. При проектировании спуска воды в нижние горизонты необходимо учитывать возможность усиленного обводнения ближайших шахт, разрабатывающих полезное ископаемое на более низких отметках. Кроме того, необходимо учитывать, что спуск загрязненной воды из горных выработок возможен только в том случае, когда воды поглощающего горизонта не используются для питьевого водоснабжения.

Опережающие выработки. При проходке горных выработок поступление воды, иногда катастрофическое, часто наблюдается только у забоя. Особенно много поступает воды из забоя при пересечении тектонических трещин, зон разлома, карстовых воронок, иногда при подходе к старым затопленным выработкам или «горелым» породам (Кузбасс, Ангренское месторождение в Средней Азии и др.). В подобных случаях для предотвращения катастрофических прорывов воды проходят опережающие скважины, передовые штреки и устанавливают предохранительные перемычки.

Опережающие скважины (рис. 95) проходят из забоя выработки в горизонтальном или наклонном положении на 10—150 *м*. Проходка этих скважин осуществляется с принятием необходимых мер предосторожности.

Передовые штреки проходят на месторождениях, где в основании полезного ископаемого залегают водоносные пески с значительным напором. Передовой штрек имеет небольшое сечение и располагается над водоносным горизонтом на высоте 5—7 *м*. В почве штрека устраивают водопонижающие колодцы и скважины, откачка воды из которых и обеспечивает нужное снижение напоров.

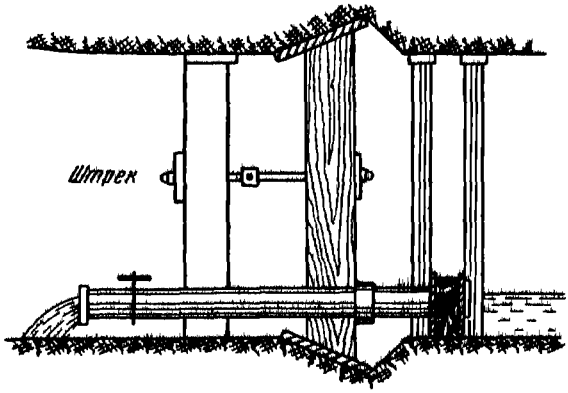


Рис. 96. Разрез водонепроницаемой перемычки

Предохранительные перемычки устраивают на участках ожидаемого большого притока воды (из старых выработок, горелых пород и т. п.), с которыми установленные на руднике насосы справиться не смогут; угрожающий участок отделяют от остальных выработок водонепроницаемыми или фильтрующими перемычками. На некоторых сильно обводненных месторождениях в целях большей безопасности ведения работ перемычки устанавливают заблаговременно в наиболее ответственных местах: вблизи рудничных дворов, у насосных камер и т. п.

Водонепроницаемые перемычки возводят из дерева, бетона, железобетона, кирпича, шлакоблоков, бетонита и других материалов, способных выдерживать односторонний напор воды. Для устройства перемычек в стенках выработок делают одну или несколько врубок со скошенными поверхностями, чтобы под давлением воды перемычка работала как клин. Породы, в которых возводятся перемычки, должны быть достаточно прочными, водонепроницаемыми, без трещин. При ведении эксплуатационных работ перемычки не должны подрабатываться; при необходимости под перемычкой оставляют целики.

У подошвы выработок в перемычках заделывают трубы с запорными кранами или задвижками для организованного спуска воды из-за перемычки. Приемный конец трубы, заканчивающийся перфорированным колпаком, ограждается решеткой. Вверху перемычки

вставляют тонкую трубку для выпуска воздуха, которую используют также для манометрических замеров напора воды за перемычкой. В перемычках часто устраивают лаз для людей, для чего в тело перемычки заделывают стальную трубу диаметром не менее 500 *мм* с запорным приспособлением (рис. 96).

§ 101. Проходка горных выработок в области развития многолетнемерзлых пород

Строительство и эксплуатация горнорудных предприятий в северных районах СССР осуществляется в весьма сложных и своеобразных условиях. При освоении месторождений, залегающих в многолетнемерзлых породах, помимо трудности разработки рыхлых мерзлых пород и их протаивания при проветривании выработок подогретым воздухом, приходится считаться и со специфическими гидрогеологическими условиями, осложняющими ведение горных работ. Под влиянием вентиляции тепловое равновесие горных пород нарушается и водоносные горизонты, будучи в мерзлом состоянии водоупорными, превращаются в водопроницаемые, что и приводит к поступлению в горные выработки воды. Водопритоки, как правило, с течением времени увеличиваются. Но особенно существенное влияние на обводненность горных выработок оказывают подземные воды, приуроченные к региональным таликам и связанные с поверхностными водотоками и водоемами.

Освоение месторождений полезных ископаемых в указанной гидрогеологической обстановке сопряжено со значительными трудностями, что требует проведения защитных мер по борьбе с водопритоками в горные выработки. Так, по данным П. М. Патиченко, Талнахское полиметаллическое месторождение не может быть отработано без проведения специальных осушительных мероприятий.

Проведенные за последние годы мерзлотно-гидрогеологические исследования в районе Талнахского месторождения, по долинам горных рек Охотско-Колымского и Чукотского нагорий и в других районах показали, что на Крайнем Севере многолетнемерзлые породы не представляют собой сплошного экрана, изолирующего подземные воды от поверхностных. Они пронизаны таликами, особенно в местах развития поверхностных водотоков и водоемов, что обеспечивает весьма тесное и сложное взаимодействие подземных и поверхностных вод. Поэтому наибольшие трудности освоения месторождений в этих районах определяются наличием таликов. Особенно обильные водопритоки наблюдаются из ледниково-моренных отложений древних долин и зон тектонических нарушений.

Меры борьбы с водопритоками различны и зависят от особенностей гидрогеологических условий, что устанавливается по данным гидрогеологических исследований. Подробно способы борьбы с водопритоками рассмотрены в § 100. Как уже указывалось, горные работы в первую очередь надо проводить на участках, удаленных от таликов и поверхностных водотоков и водоемов.

§ 102. Методы осушения угольных месторождений для подземной газификации

В процессе подземной газификации углей (ПГУ) на месторождениях возникают некоторые специфические условия: высокие температуры, обусловливающие изменение структуры и других свойств пород, вмещающих пласт угля, что вызывает изменение их водопроводимости; обрушение пород кровли над выгазованным пространством, что приводит к нарушению сплошности пород и проникновению в газогенераторы вод из надугольных песков; повышение уровня

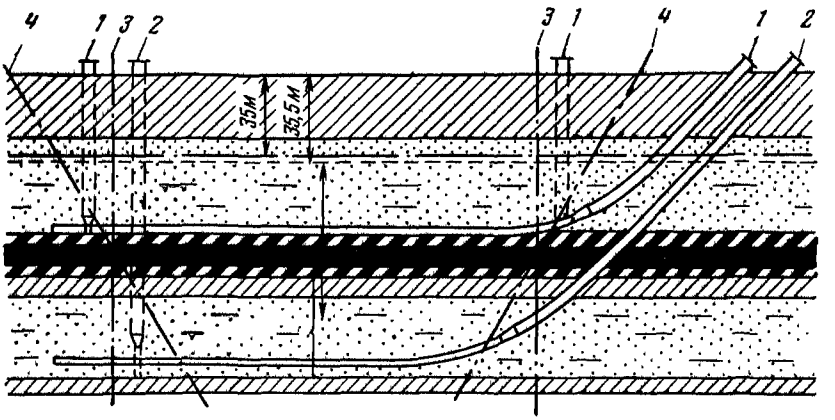


Рис. 97. Схема расположения наклонно-горизонтальных водопонижающих скважин

1 — скважины в надугольном водоносном горизонте; *2* — скважины в подугольном водоносном горизонте; *3* — границы газогенератора; *4* — предполагаемый угол сдвижения пород при выгазовывании угля

вод в подугольном водоносном горизонте в связи с нагнетанием в газогенераторы воздуха, что может обусловить подтопление огневого забоя газогенератора.

При выборе схемы осушения участков ПГУ необходимо располагать следующими данными: о геологическом строении, в частности о литологических особенностях пород; о гидрогеологических условиях; о местоположении газогенераторов в пределах геологических структур; о местоположении и размерах первоначального канала газификации, расположении наклонных и вертикальных газоотводящих скважин и т. п.

При слабой обводненности угольного пласта и вмещающих пород гравитационные и другие виды подземных вод могут полностью испаряться и выходить на поверхность земли вместе с газом. Следовательно, при водопритоке до 1 $м^3/ч$ сооружения специальных дренажных устройств не требуется. При больших водопритоках проникновение подземных вод в огневой забой нарушает технологический процесс, что недопустимо; для предотвращения этого и осуществляется осушение месторождений.

Первоначальный канал газификации на участках с наклонным залеганием угольного пласта следует прокладывать на наиболее низких гипсометрических отметках с последующим продвижением огневого забоя по восстанию пласта. Это будет способствовать проникновению подземных вод в нижние выгазованные участки, а верхние, где находится огневой забой, будут неподтопленными.

Предварительное и параллельное осушение участков ПГУ в основном осуществляется вертикальными и наклонно-горизонтальными скважинами. Вертикальные скважины рекомендуется закладывать в наиболее пониженных местах залегания осушаемого водоносного горизонта и в нижних частях действующих газогенераторов, где водопроводимость частично обрушившихся пород наиболее высокая.

Наклонно-горизонтальные скважины в водоносные горизонты закладывают вдоль каждой из сторон газогенераторного участка (рис. 97); в надугольном водоносном горизонте эти скважины следует располагать вне зоны обрушения. Заложенные с поверхности системы взаимодействующих скважин и продолжительная непрерывная откачка воды из них обеспечивают осушение участков ПГУ. Приближенно величина водопритоков в дренажные устройства определяется по формулам динамики подземных вод.

ГЛАВА XXIV

МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ПОДЗЕМНЫМИ И ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОДАМИ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

§ 103. Основные задачи открытой разработки

Открытая разработка месторождений полезных ископаемых имеет целый ряд преимуществ перед подземной и в технико-экономическом отношении более прогрессивна. Поэтому перед горнодобывающей промышленностью Советского Союза стоит задача повсеместно развивать открытую разработку твердых полезных ископаемых.

Применение мощной техники при вскрытии и ведении очистных работ в карьерах позволяет выполнять работы по всему технологическому процессу без применения ручного труда. Капитальные затраты на 1 *т* годовой добычи угля в 1,5—2,5 раза меньше по сравнению с затратами при подземном, а сроки строительства угольных и других карьеров сокращаются в 2—3 раза по сравнению со сроками строительства шахт. Существенное значение имеет также и то, что при открытой добыче потери угля составляют 3—5%, а при подземном способе они достигают 10—20% и иногда более. Условия труда в карьерах более благоприятны, чем под землей.

В настоящее время открытая разработка различных полезных ископаемых ведется на глубинах 300—400 *м*, а в ближайшее время

будет осуществляться на глубинах 500—700 м и более (до 1000 м). Открытая разработка чаще всего применяется при разработке углей (на Урале, в Кузбассе, в Сибири и других местах), железных и марганцевых руд (в Никопольском и Северо-Уральском бассейнах, на месторождениях КМА и др.), полиметаллических месторождений (Зыряновское и др.), строительных материалов (глин, песков, известняков, доломитов), россыпных месторождений, бокситов, горючих сланцев и т. п.

Открытая разработка требует очень тщательного изучения вопроса о сохранении устойчивости бортов карьеров в процессе эксплуатации. Наблюдавшиеся на многих карьерах оползни вносили очень значительные осложнения при ведении горных работ. Следовательно, сохранение равновесия земляных масс является специфической и весьма актуальной задачей при открытой разработке полезных ископаемых.

Как уже неоднократно указывалось, при открытой разработке необходимо правильно и объективно учитывать природные особенности месторождений, которые отличаются чрезвычайно большим разнообразием. При решении вопросов осушения полей карьеров необходимо выделять следующие ведущие признаки, в совокупности влияющие на выбор способа осушения.

1. Геологическое строение поля карьера и характеристика устойчивости пород в уступах. При простом однородном строении и при условии залегания полезного ископаемого в устойчивых породах осушение не вызывает особых затруднений. Если же наблюдается переслаивание устойчивых и неустойчивых пород, проявление суффозии и оползней условия разработки будут сложными и вопросы осушения приобретают большую важность.

2. Количество водоносных горизонтов, литологический состав обводненных пород, их мощность, водопроницаемость, глубина залегания, величина напоров, взаимосвязь между собой и др. Чем больше водоносных горизонтов, выше их напоры и меньше водопроницаемость, тем труднее дренировать карьерное поле и тем больше требуется времени для создания нормальных условий ведения горных работ.

3. Вид ресурсов подземных вод. При больших динамических притоках потребуется постоянное поддержание заданных понижений уровней и систематическое расширение депрессионной воронки впереди движения фронта горных работ. Если же будут срабатываться статические запасы, то потребуются относительно простые и временные дренажные мероприятия.

4. Наличие на поле карьера или вблизи него поверхностных водотоков и водоемов, откуда возможна фильтрация воды в карьер, для предотвращения которой потребуется осуществление специальных осушительных мероприятий.

5. Атмосферные осадки и особенно их интенсивность. На крупных карьерах ливни могут составлять большую часть водопритоков, что заставляет держать наготове мощные водоотливные установки.

От величины водопритоков в карьер в значительной степени зависит экономичность разработки месторождения, поэтому объективное установление этой величины является одной из основных задач рудничной гидрогеологии.

Как уже указывалось, для осушения полей карьеров используются все три способа: поверхностный, подземный и чаще всего комбинированный. О. Б. Скиргелло на основании анализа материалов осушения 30 карьеров, расположенных в самых различных районах нашей страны, для выбора схемы осушения все месторождения подразделяет на четыре группы.

Месторождения I группы сложены устойчивыми скальными и полускальными породами, не подверженными суффозионным и оползневым явлениям. На карьерных полях не требуется проведение специальных осушительных мероприятий. Горные работы могут производиться с открытым водоотливом; поступающая в карьер вода собирается в дренажные траншеи и водосборники, откуда и откачивается. При ведении открытых работ на месторождениях I группы учитываются климатические факторы. В условиях суровых зим даже незначительное подтопление подземными водами забоев карьеров обусловливает обмерзание железнодорожных путей, ходовой части землеройных механизмов и смерзание добытого полезного ископаемого, что увеличивает его влажность и весьма усложняет транспортировку. Это требует проведения специальных мероприятий по осушению карьеров, расположенных в районах с длительными и суровыми зимами (Волчанский угольный, Ахтенский железорудный и многие другие). Наиболее экономичным и эффективным способом осушения этих карьеров является поверхностный при помощи небольшого числа водопонижающих скважин, закладываемых как вне карьера, так и на его вскрышных уступах.

Месторождения II группы сложены неустойчивыми песчано-глинистыми породами, песчаные разности пород обводнены. Это требует обязательного проведения работ по их осушению, которое наиболее эффективно осуществляется комбинированным способом. К месторождениям данного типа относятся: Никопольский марганцевый бассейн, буроугольные Кушмуруна и Сибири, Лисаковское и Камыш-Бурунское железорудные, россыпные олова, золота, вольфрамита и др.

Месторождения III группы приурочены к скальным сложнодислоцированным породам, перекрытым мощной толщей неустойчивых пород, включающей несколько водоносных горизонтов. Дренирование карьеров, разрабатывающих месторождения этого типа, в основном осуществляется комбинированным способом. К месторождениям данного типа относятся: железорудные КМА и Сарбайско-Соколовское, Зыряновское и Лениногорское полиметаллические и др.

Месторождения IV группы приурочены к закарстованным породам. Осушение полей карьеров проводится поверхностным или комбинированным способами. К месторождениям этой группы относятся Эстонские и Ленинградские сланцевые и др.

§ 104. Поверхностный горизонтальный дренаж

Поверхностный горизонтальный дренаж часто применяется при открытой разработке стройматериалов (гравия, песка и др.) и россыпных месторождений, где основной обводняющий горизонт залегает неглубоко и перекрывает продуктивные отложения. Осуществляется он заложением открытых канав (дрен), собирающих воду. По положению в плане дрены могут быть кольцевые, контурные и параллельные.

Кольцевые дрены закладывают по всему периметру разрабатываемого участка, когда подземные воды поступают к полю карьера со всех сторон. Контурные дрены — по одной составляющей периметра на пути движения потока подземных вод от источника питания к полю карьера, параллельные дрены, или система канав, — в условиях, когда по гидрогеологическим особенностям поток подземных вод не может быть полностью перехвачен контурной дреной. Канавы располагаются на некотором расстоянии одна от другой в зависимости от водопроводимости пород. Сброс воды из канав осуществляется самотеком, для чего их дну придается определенный уклон.

Первые два типа горизонтального дренажа являются постоянно действующими сооружениями и постепенно удлиняются по мере продвижения вскрышных и очистных работ. Дрены третьего типа закладывают по мере надобности в зависимости от порядка отработки карьерного поля.

Глубина горизонтальных дрен может достигать 15—20 *м*. При бо́льшей глубине залегания обводняющего водоносного горизонта целесообразнее применять вертикальный дренаж. Горизонтальный дренаж может осуществляться в виде открытых канав или подземных водосборных галерей, по дну которых укладываются дренажные коллекторы из перфорированных железобетонных колец диаметром около 1—2 *м*. Притоки и горизонтальные дрены рассчитываются по формулам динамики подземных вод. Водопритоки из продуктивных отложений, расположенных ниже горизонта самотечных горизонтальных дрен, определяются по методу «большого колодца»; соответственно ожидаемому водопритоку определяется емкость водосборников и мощность насосно-силового хозяйства карьера, которое должно также устраиваться с учетом интенсивности атмосферных осадков, которые будут выпадать на площади карьерного поля.

Осушение поля карьера горизонтальными дренами с успехом было проведено на Ангренском буроугольном месторождении, на Александровском карьере в Никопольском марганцевом бассейне и в других местах.

§ 105. Отвод русел рек за пределы карьерных полей

Наиболее выгодные условия вскрытия полезного ископаемого и его последующей разработки открытым способом имеются по долинам оврагов, балок и рек, по которым текут временные или

постоянные водотоки. Это вызывает необходимость отвода русел рек за пределы карьерных полей. Поскольку глубины открытых разработок увеличиваются и площадь поля карьера может возрастать и даже выходить за пределы долины реки, то во избежание затрат на повторный отвод русел рек трассы отводных каналов должны намечаться с расчетом, чтобы они могли служить в течение 50—75 лет.

Отвод русел рек был осуществлен на Ангренском и Богословском буроугольных и других месторождениях.

§ 106. Глубокое водопонижение

При преобладании в покрывающих и подстилающих полезное ископаемое породах мелко- и тонкозернистых песков поле карьера, как правило, осушается комбинированным способом. При наличии на поле карьера пород со средней и высокой водопроводимостью осушение надпродуктивных отложений и снижение напоров в подпродуктивных водоносных горизонтах достигается устройством с поверхности системы взаимодействующих водопонизительных скважин, оборудованных глубинными насосами.

Для иллюстрации приводится описание осушения глубоким водопонижением, осуществленное на Айдырлинском карьере комбината Южуралникель. В известняки, являющиеся боковой породой, были пробурены две скважины диаметром 204 *мм* и глубиной более 20 *м*, оборудованные глубинными насосами производительностью 120 $м^3/ч$ каждый. До их устройства вода из карьера удалялась открытым водоотливом (работал насос производительностью 60 $м^3/ч$). Проектное понижение было достигнуто при суммарном количестве откачиваемой воды из скважин, равном в среднем 123 $м^3/ч$.

§ 107. Комбинированное осушение

Этот способ применяется при карьерной разработке месторождений со сложными гидрогеологическими условиями (железорудные месторождения КМА, буроугольные и др.). Выделяют строительное и эксплуатационное водопонижение.

В процессе строительного водопонижения снижаются уровни подземных вод с опережением фронта вскрышных работ. Под защитой созданных воронок депрессий проходят дренажные горные выработки (обычно штреки) на отметках подошвы пласта полезного ископаемого либо ниже горизонта разработок. В дренажных штреках устанавливают забивные фильтры, водопонижающие колодцы и скважины и другие дренажные устройства.

При эксплуатационном водопонижении, продолжающемся в течение всего периода работы карьера, объем дренажных подземных выработок увеличивается, расширяются контуры депрессионных воронок. Основной целью эксплуатационного водопонижения является полное осушение надпродуктивных водоносных горизонтов, что при прочих равных условиях (высота рабочих

уступов и углы их залежения) обеспечивает устойчивость бортов карьера от фильтрационного разрушения. Наиболее успешно осушение надпродуктивных водоносных горизонтов и попутно снижение напорных уровней в подпродуктивных горизонтах осуществляют при помощи штолен, закладываемых из забоя карьера на расстоянии 100—500 *м* одна от другой в местах наиболее низкого гипсометрического положения подошвы полезного ископаемого. Примерно через указанные расстояния штольни сбивают поперечными штреками, которые также по возможности закладывают в местах наиболее низкого гипсометрического положения подошвы пласта. В штольнях и штреках устанавливают забивные и сквозные фильтры и другие дренажные сооружения, рассмотренные в § 100. Штольни по мере продвижения забоя карьера удлиняют с таким расчетом, чтобы осушительные мероприятия опережали фронт вскрышных работ на 1—5 лет в зависимости от эффекта осушения надпродуктивных обводненных толщ. Чем ниже фильтрационные свойства осушаемых пород, тем продолжительнее срок их осушения и тем самым больше срок работы штолен.

§ 108. Водопонижение горизонтальными и наклонными скважинами

В период эксплуатации карьера, когда его глубина доведена до проектной и вскрыты все водоносные горизонты в надпродуктивной толще, для осушения бортов карьера целесообразно закладывать с рабочих уступов горизонтальные водопонижающие скважины, что впервые было предложено А. А. Вопилкиным в 1936 г. для осушения карьеров в Днепровском бассейне. В 1961 г. Л. В. Крупкиным была предложена схема дренажа горизонтальными скважинами для осушения рабочих бортов на Лебединском карьере КМА. Горизонтальные водопонижающие скважины длиной 70 *м* закладывались по мере продвижения забоя через 40 *м*, что обеспечивало устойчивость борта карьера от фильтрационного разрушения. Подобная же схема осушения предусмотрена для Стойленского карьера в КМА в период его эксплуатации. Для обеспечения самотечного оттока воды из скважин их закладывают под некоторым углом с восстанием в сторону продвижения забоя.

Горизонтальные скважины обычно устраивают задавливанием домкратами в породы фильтровых щелистых труб. Иногда вначале задавливают глухие трубы, в которые затем вставляют фильтровые, а глухие извлекают.

§ 109. Понятие об иглофильтровых установках, электроосушении и электрохимическом закреплении глинистых пород

И г л о ф и л ь т р о в ы е у с т а н о в к и широко применяются для осушения строительных котлованов, но в последнее время их с успехом стали использовать и при проведении горных

выработок. Иглофильтровая водопонизительная установка состоит из ряда 38—75-миллиметровых труб, расположенных через 0,5—2 *м* и более и подключенных к общему сборному трубопроводу, подсоединенному к вакуум-насосу или компрессору (рис. 98). Одноярусная иглофильтровая установка обеспечивает понижение уровня подземных вод на 5—6 *м*. При необходимости более глубокого понижения уровня устраивают двух- или трехъярусные (и более) установки, закладывая их на бермах на откосах котлована.

Но многоярусные иглофильтровые установки создают значительные неудобства при производстве в котловане строительных работ.

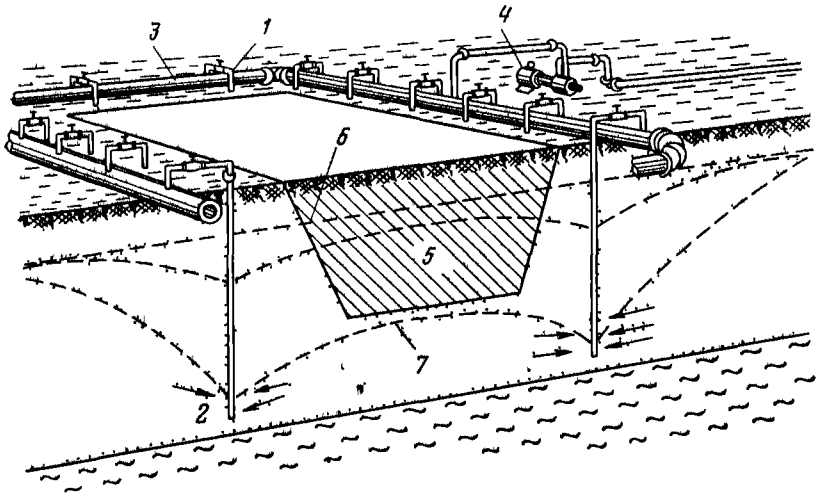


Рис. 98. Схема действия иглофильтров

1 — иглофильтры, *2* — перфорированная часть иглофильтра, *3* — трубопровод (коллектор), *4* — самовсасывающий вихревой насос, *5* — котлован, *6* — естественный уровень грунтовых вод; *7* — сниженный уровень

Учитывая это, В. К. Ярцев разработал специальную конструкцию вакуум-нагнетательного типа эрлифта, что позволило разработать конструкцию «глубоких иглофильтров», позволяющих при одноярусной установке понижать уровень подземных вод на 10—12 *м* и более. Захватная способность глубоких иглофильтров благодаря создаваемому ими вакууму в 5—12 раз больше чем мелких. Поэтому один глубокий иглофильтр заменяет два-три яруса мелких установок, а по производительности — 15—20 мелких фильтров.

Электроосушение, или электродренаж, применяется для дренирования водоносных толщ с очень низким коэффициентом фильтрации (меньше 1 *м/сутки*); наиболее эффективно электроосушение осуществляется в глинах текучей и пластичной консистенции, илах, суглинках, супесях и частично в пылеватых и мелкозернистых песках, т. е. во всех видах глинистых (связных) грунтов.

Л. И. Курденков для предварительной оценки возможности практического использования электроосмоса в целях осушения предложил следующую классификацию грунтов: 1) высокоактивные, с коэффициентом фильтрации 10^{-9} —10^{-7} *см/сек* и удельным электроосмотическим давлением * 10^{-5} —10^{-3} *см/в*; к ним относятся глины пластичной и текучей консистенции и глинистые илы; 2) активные, с коэффициентом фильтрации 10^{-9} —$4 \cdot 10^{-6}$ *см/сек* и удельным электроосмотическим давлением 10^{-3}—25 *см/в*; к ним относятся также глины и частично суглинки и суглинистые илы; 3) среднеактивные, с коэффициентом фильтрации $4 \cdot 10^{-8}$ —$4 \cdot 10^{-5}$ *см/сек* и удельным электроосмотическим давлением 25—2,5 *см/в*; к ним относятся суглинки, суглинистые илы и частично глины пластичной и текучей консистенции и глинистые илы; 4) слабоактивные, с коэффициентом фильтрации $4 \cdot 10^{-7}$—$4 \cdot 10^{-4}$ *см/сек* и удельным электроосмотическим давлением 2,5—0,25 *см/в*; к ним относятся суглинки, супеси, суглинистые и супесчаные илы, частично пылеватые пески; 5) неактивные, с коэффициентом фильтрации больше $4 \cdot 10^{-4}$ *см/сек* и удельным электроосмотическим давлением меньше 0,25 *см/в*; к ним относятся скальные нетрещиноватые породы (с коэффициентом фильтрации меньше 10^{-9} *см/сек*), пески (крупные, средние и мелкие), частично пылеватые пески, а также глины и высокопластичные суглинки твердой консистенции.

Электроосушение основано на явлении электроосмоса, под которым понимается движение молекул воды под влиянием внешнего электрического поля. Как уже указывалось, в порах мелкодисперсных грунтов вода большей частью присутствует в виде физически связанной воды, жесткие диполи ее ориентированы не только у поверхности электроотрицательно зараженной грунтовой частицы, но и около катионов диффузного слоя, образуя так называемый рыхлый слой физически связанной воды.

При пропускании через грунт постоянного электрического тока катионы диффузного слоя устремляются к катоду, увлекая при этом и ориентированные около них диполи воды, что и обусловливает осушение грунтов.

Электроосушение с наибольшим эффектом применяется в комбинации с иглофильтровыми установками (рис. 99). Отрицательный полюс при этом подключается к иглофильтрам, а положительный — к металлическим стержням, устанавливаемым параллельно иглофильтрам.

Электродренирование с успехом было применено в 1937 г. при проходке котлована в глинистых породах в Москве, на строительстве Волго-Донского канала им. В. И. Ленина, на шахте «Каменецкая»

---

* Под удельным электроосмотическим давлением понимается изменение гидростатического давления в поровой воде под влиянием постоянного электротока; $h_э = \frac{k_э}{k_г}$, где $k_э$ и $k_г$ — соответственно коэффициенты электроосмотической и гидравлической фильтрации, определяемые опытным путем.

в Подмосковном бассейне и в других местах. Электроосушение применяется также для последующего укрепления глинистых грунтов химическими растворами. Это основано на том, что при удалении из пор таких грунтов физически связанной воды их водопроницаемость резко возрастает, нагнетаемые растворы проникают в толщу глинистых пород и закрепляют их. Осушение мелкодисперсных грунтов обычно достигается при расходе электроэнергии примерно 5—7 *квт/ч* на 1 *м*³ породы.

Электрозакрепление глинистых грунтов. При пропускании через мелкодисперсные грунты постоянного элек-

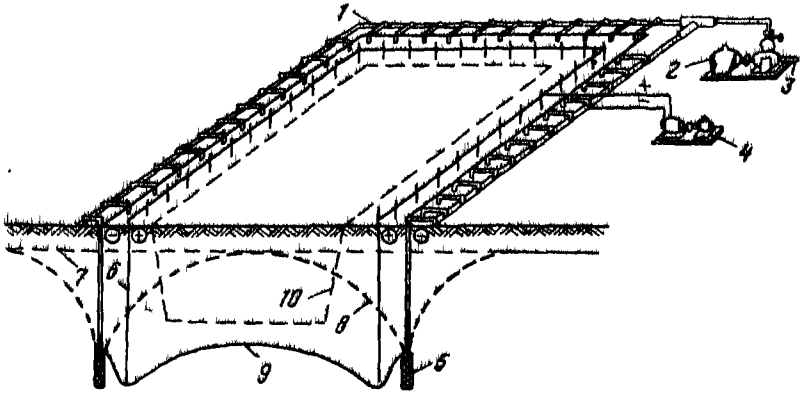


Рис. 99. Схема установки для электроосушения

1 — коллекторы иглофильтров; *2* — насосный агрегат; *3* — водосброс; *4* — двигатель-генератор; *5* — иглофильтр; *6* — аноды; *7* — естественный уровень грунтовых вод; *8* — уровень, сниженный под действием иглофильтров; *9* — уровень, сниженный под действием электродренажа; *10* — граница котлована

трического тока в течение длительного времени в них протекают не только явления электроосмоса, уменьшающие их влажность, но и сложные физико-химические процессы (изученные еще недостаточно), в результате чего грунты упрочняются, теряют в дальнейшем способность к набуханию и размоканию. Расход электроэнергии для необходимого закрепления 1 *м*³ грунта составляет 40—50 *квт/ч*.

Если в грунт одновременно нагнетается какой-либо раствор (например, хлористый кальций), то достигается еще больший эффект в упрочнении мелкодисперсных слабо устойчивых грунтов. Например, прочность на раздавливание суглинка до закрепления составляла 1 *кГ/см*², а после закрепления на участке между электродами достигла 21 *кГ/см*². Способ закрепления грунтов с помощью электротока и нагнетания раствора называется электрохимическим.

В горнодобывающей промышленности электроуплотнение и электрохимическое закрепление грунтов начинает внедряться для предотвращения процессов пучения в горных выработках. В строитель-

ном деле эти методы уже нашли широкое применение при укреплении слабых грунтов в основании сооружений, в откосах выемок, каналов и т. п.

§ 110. Дренирование внутренних отвалов и выработанного пространства

При разработке полезных ископаемых открытым способом породы вскрыши, которые складируются в выработанное пространство, называются внутренними отвалами. Необходимо под-

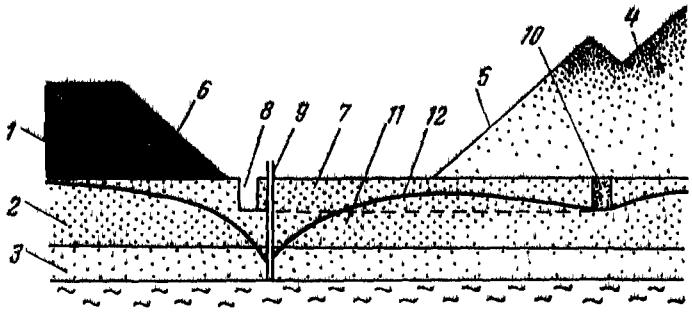


Рис. 100. Схема дренажа оснований внутренних отвалов и выработанного пространства

1 — бурый уголь; *2* — пески мелкозернистые; *3* — пески крупнозернистые; *4* — отвальные массы; *5* — откос внутренних отвалов; *6* — добычный откос; *7* — выработанное пространство; *8* — дренажная канава; *9* — водопонизительные скважины; *10* — дренажная канава с фильтрующей засыпкой; *11* — поперечная водоотводная канава; *12* — уровень подземных вод

держивать откосы отвалов в устойчивом состоянии, так как это обеспечивает нормальную работу карьера. Откосы отвалов приходят в неустойчивое состояние чаще всего при обводнении их основания подземными водами, для предотвращения чего приходится осуществлять дренажные мероприятия, которые одновременно используются и для дренирования выработанного пространства. Дренажные устройства для предотвращения подтопления оснований внутренних отвалов и дренирования выработанного пространства разнообразны и выбор их осуществляется на основе гидрогеологических расчетов и технико-экономических показателей.

Наиболее просто устройство горизонтальных дренажных канав (из которых вода стекает в водосборники и затем откачивается насосами) в комбинации с водопонизительными скважинами (рис. 100). Продольные дренажные канавы для сохранения общего их уклона иногда приходится заглублять на 5—6 *м* ниже поверхности выработанного пространства. Перед засыпкой канавы отвальными массами ее заполняют хорошо дренирующим материалом.

§ 111. Материалы, необходимые для проектирования осушительных работ

Как указывалось, открытый способ разработки полезных ископаемых становится основным в развитии горнодобывающей промышленности нашей страны. Но значительное число месторождений, разрабатываемых и намечаемых к разработке открытым способом, находится в сложных гидрогеологических условиях и требует при их освоении производства большого комплекса дренажных работ. Осушение карьеров представляет собой одну из основных статей расходов, определяющих стоимость товарной продукции.

Исследования технико-экономической эффективности различных способов осушения месторождений при открытой разработке, выполненными в ЦНИИгоросушение (ныне ВИОГЕМ) установлено, что эффект и экономические показатели осушения зависят в основном от степени гидрогеологической изученности месторождений, сложности общих природных условий, производительности карьеров, выбранного способа осушения и состояния технических средств для сооружения дренажных устройств.

Следовательно, для успешного решения задач при проектировании осушительных мероприятий на поле карьера или всего месторождения в целом необходимо иметь исчерпывающие данные о гидрогеологических условиях месторождений, о гидрогеологических параметрах водоносных горизонтов, областях их питания и другие, что дает возможность выбрать оптимально благоприятный вариант дренажных мероприятий.

Осушительные работы на поле карьера выполняются по проекту, в основу которого кладутся материалы, получаемые в процессе ведения гидрогеологических исследований при поисках и разведке твердых полезных ископаемых. Соответствующими организациями разработано «Руководство по дренированию карьерных полей». При проектировании осушения карьера на стадии проектного задания необходимо учитывать: геологическое строение поля карьера; гидрогеологические условия (наличие водоносных горизонтов, их состав, мощность, положение относительно полезного ископаемого, водообильность, фильтрационные свойства, условия питания и т. п.); физико-механические свойства пород вскрыши и полезного ископаемого; рекомендуемые способы осушения и технико-экономическую эффективность предлагаемых методов осушения. Сравнение вариантов осушения и дает возможность выбрать наиболее целесообразный из них.

На стадии рабочих чертежей в проект осушения должны входить:

1) детальная разработка принятой схемы осушения с проведением контрольных расчетов по прогнозу водопритока и уточнению количества дренажных устройств, с широким использованием метода ЭГДА, гидроинтегратора В. С. Лукьянова и других методов моделирования (сеточных);

2) уточненное местоположение дренажных устройств;

3) детальная разработка конструкций различных типов дренажных устройств с составлением спецификации на оборудование и материалы;

4) разработка технологии проходки дренажных устройств (скважин, штреков и др.);

5) смета по рабочим чертежам с указанием возможных источников экономии.

Рабочий проект осушения карьера составляется на основе материалов, полученных не только в процессе разведочных работ, но и с учетом данных опытно-производственного водопонижения, осуществляемого по разработкам, намеченным в проектном задании по осушению поля карьера. Опытно-производственное водопонижение дает возможность более точно определить все расчетные гидрогеологические параметры (коэффициенты фильтрации и пьезопроводности, режимные факторы, прогноз осушительного эффекта во времени, технико-экономическую эффективность конструкций скважин, фильтров и насосов и др.). Скважины для опытно-производственного водопонижения закладывают на участках въездной и разрезной траншей; проводится водопонижение в течение многих месяцев. Опытное производственное водопонижение нередко является начальной стадией строительного водопонижения.

На основе проектных разработок дренажных мероприятий, являющихся составной частью общего проекта вскрытия и разработки месторождения, и осуществляется осушение поля карьера.

В заключение следует отметить, что строительство и эксплуатация горных предприятий на месторождениях полезных ископаемых со сложными гидрогеологическими и инженерно-геологическими условиями для нашей страны является чрезвычайно актуальной проблемой.

ГЛАВА XXV

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА НА ШАХТАХ, РУДНИКАХ И КАРЬЕРАХ

§ 112. Основные задачи гидрогеологической службы

В связи с мощным развитием в СССР горнодобывающей промышленности и разработкой многих месторождений, гидрогеологические условия которых являются сложными и весьма сложными, возникла необходимость в специальном изучении гидрогеологических особенностей обводненных месторождений в целях выработки наи-

более рациональных мероприятий по борьбе с подземными водами. Раздел гидрогеологии, изучающий рудничные, или шахтные, воды, получил наименование р у д н и ч н о й, или ш а х т н о й, г и д р о г е о л о г и и.

Геологическое и гидрогеологическое обслуживание действующих шахт, рудников и карьеров в нашей стране регламентировано «Положением о рудничной, шахтной и промысловой геологической службе на горнодобывающих предприятиях», составленным в 1960 г. Министерством геологии СССР и обязательным для всех организаций, ведущих разработку различных месторождений полезных ископаемых. ВИМС и ВСЕГИНГЕО создали «Временную инструкцию по геологическому обслуживанию горнорудных предприятий» и временные инструкции по геологическому обслуживанию горных предприятий, разрабатывающих различные месторождения полезных ископаемых, а также «Временную инструкцию по гидрогеологическому и инженерно-геологическому обслуживанию горно-эксплуатационных работ на месторождениях твердых полезных ископаемых».

Основными задачами шахтной гидрогеологии являются: изучение гидрогеологических условий разведуемых и разрабатываемых месторождений с целью получения более полных данных о распространении водоносных горизонтов, их мощности, условиях питания, фильтрационных свойствах, водообильности, поведении пород при вскрытии и эксплуатации; гидрогеологическое и инженерно-геологическое обоснование строительства карьеров, проходки стволов шахт и прочих горных выработок (рудничных дворов, штреков, нарезных и очистных выработок); изучение режима водопритоков в шахты и режима подземных вод на шахтном поле; изучение действия и эффективности водопонизительных установок и прочих дренажных мероприятий и внесение нужных изменений в их работу; изучение химического состава шахтных вод и разработка мер борьбы с их агрессивностью, а также установление возможности использования этих вод на разные нужды; разработка теоретических основ для определения притоков в шахты в разных условиях; разработка наиболее рациональных способов борьбы с шахтными водами; решение вопросов подработки горными выработками поверхностных водотоков и водоемов; гидрохимические исследования с целью выявления новых рудных тел при проведении эксплуатационной разведки и доразведки разрабатываемого месторождения; охрана источников водоснабжения от истощения под влиянием эксплуатации месторождения; установление влияния применяемых систем разработки месторождений на осложнение гидрогеологических и инженерно-геологических условий его эксплуатации; обобщение материалов гидрогеологических и инженерно-геологических исследований и наблюдений.

Дальнейшее уточнение и совершенствование методов рудничной гидрогеологии позволит применять наиболее эффективные способы борьбы с шахтными водами, что при все большем внедрении средств механизации и автоматизации в горной промышленности является

одной из основных предпосылок успешной работы горного предприятия. Активная борьба с водой на шахтах и рудниках предохраняет их от всяких случайностей аварийного характера (затопления, прорывов плывунов и т. п.), создает благоприятные условия труда, предохраняет дорогостоящие механизмы и крепление от агрессивного воздействия воды.

Успех борьбы с водопритоками в горные выработки зависит от того, насколько правильно гидрогеолог представляет все особенности геологического строения и гидрогеологические условия данной шахты или рудника в их совокупности и взаимосвязи и влияния применяемых дренажных мероприятий на изменение гидрогеологических условий. Поэтому гидрогеолог должен собрать и обработать все имеющиеся материалы по геологии и гидрогеологии данного месторождения. В дальнейшем необходимо систематически собирать и обрабатывать все фактические данные по обводненности шахты. Сбор фактических материалов заключается в детальном описании степени и характера обводненности шахты на разных ее участках и горизонтах, описании поведения пород почвы и кровли выработок, определении напоров на почву и кровлю, фиксации тектонических трещин и карстовых пустот в пределах шахтного поля и изучении водопритоков по ним в шахту на разных горизонтах, описании водоносности самой залежи полезного ископаемого, влиянии атмосферных осадков на изменения величины водопритоков, определении радиусов влияния по различным направлениям и т. п.

Гидрогеологическая служба на шахтах и карьерах должна начинаться постановкой наблюдений уже при проходке ствола шахты и въездной траншеи. Обычно при проходке стволов или въездной траншеи имеется проектный геолого-гидрогеологический разрез, составленный по данным контрольного бурения, на котором показаны все водоносные горизонты, пересекаемые стволом шахты, и ожидаемые притоки. В процессе проходки ствола шахты, въездной и разрезной траншей составляется литологический разрез, определяется фактический приток из каждого водоносного пласта и характер поступления воды. Эти данные заносятся в специальный журнал.

При проходке подготовительных, нарезных и очистных выработок удается точно изучить: литологию вмещающих полезное ископаемое пород; характер трещиноватости и закарстованности пород; характер тектонической нарушенности; степень водоносности полезного ископаемого; характер поступления воды в горные выработки (капеж, сосредоточенные струи, редкие струи, сплошные водопритоки и т. п.); характер поведения пород почвы и кровли; изменение степени обводненности по мере развития фронта работ по простиранию и в глубину; режим поверхностных и подземных вод в пределах шахтного поля и на прилежащей территории. Одновременно выясняются и другие вопросы, имеющие существенное значение для понимания причин обводненности шахты, а следовательно, и для принятия наиболее эффективных мер борьбы с притоками.

На всех шахтах, рудниках и карьерах применяется водоотлив, осуществляемый из центрального водосборника. Вода в центральный водосборник поступает из всех выработок, что не позволяет дифференцированно оценивать обводненность отдельных участков и горизонтов. Поэтому обводненность конкретных участков рекомендуется определять отдельно.

§ 113. Составление карт и разрезов

Обработка фактических материалов сводится к составлению карт, характеризующих фактическую степень обводненности шахты или карьера на отдельных участках и горизонтах в разное время, пластовых гидрогеологических карт; карт изонапоров подземных вод на почву и кровлю выработок; карт обводненности; карт фактического поступления воды по участкам и горизонтам (капеж, струи, сплошные выходы, с указанием дебита, внезапные прорывы шахтных вод и плывунов). Карты дополняют гидрогеологическими разрезами и блок-диаграммами. В разных бассейнах принято составлять карты применительно к конкретным гидрогеологическим особенностям данного бассейна или его части. Составляют также графики, указывающие на функциональную зависимость обводненности шахты от разных природных и искусственных факторов. Указанные карты составляют обычно в крупном масштабе: для всего месторождения в зависимости от его площади 1 : 25 000—1 : 5000; для отдельных шахтных полей — 1 : 500—1 : 1000; для отдельных участков шахтного поля, наиболее водообильных и характерных по условиям обводненности или по инженерно-геологическим особенностям, — 1 : 1000—1 : 500 и даже крупнее. Тщательный сбор фактических материалов, их обработка и продуманный анализ дают возможность гидрогеологу правильно определять важнейшие причины обводнения горного предприятия и в соответствии с этим предлагать наиболее рациональные способы борьбы с подземными водами.

§ 114. Наблюдения за рудничным водоотливом и режимом подземных вод

Изучение режима подземных вод на шахтном поле или карьере сводится к систематическим наблюдениям за колебанием уровней воды в наблюдательных скважинах, устроенных на шахтном поле и вблизи него; замерам дебитов родников, фонтанирующих скважин, забивных и сквозных фильтров, водопонизительных скважин и других дренажных устройств; замерам температуры воды; изучению химического состава шахтных вод по сезонам; изучению дебита, температуры и химического состава воды в местах сосредоточенных или сплошных выходов воды в горные выработки.

Длительные наблюдения за режимом подземных вод дают возможность установить: характер формирования воронки депрессии;

влияние дренажных устройств на интенсивность и степень осушения шахтного поля; влияние атмосферных осадков, поверхностных водотоков и водоемов на обводнение выработок в целом по карьеру, руднику или шахте и отдельным участкам. Стационарные режимные наблюдения дают возможность выявить влияние всех естественных и искусственных факторов на степень и характер обводненности горных выработок.

Наблюдения за шахтным водоотливом сводятся к учету работы и простоев насосов, откачивающих воду из центрального и участковых водосборников. В журнале наблюдений отмечается продолжительность работы и производительность насосов по паспорту и фактическая; последнюю следует определять либо по хорошо проверенным водомерным счетчикам, либо путем устройства на поверхности у сброса шахтных вод водосливов той или иной конструкции.

Все данные стационарных режимных наблюдений заносят в специальные журналы.

§ 115. Наблюдения за деформациями в горных выработках и на поверхности земли

Повышенное горное давление в некоторых случаях приводит к деформациям и поломке крепи выработок, что влечет за собой обрушение кровли и увеличение притока по трещинам обрушения, а также прорыв плывунов и заиление выработок. Поэтому шахтный гидрогеолог должен следить за состоянием стенок горных выработок. Там, где проявляются или возможны подобные деформации, необходимо применять усиленную крепь и чаще устанавливать забивные фильтры (если они приняты) или использовать иные способы для быстрейшего дренирования таких участков.

Опасны также деформации почвы, что часто обусловливается значительным напором подугольных вод, превосходящим сопротивление на разрыв водоупорных пород, подстилающих пласт угля или рудного тела. В подобных местах необходимо систематически следить за изменением напоров в подугольных водоносных песках, для чего бурят специальные наблюдательные скважины, а при необходимости принимать меры по снижению напоров.

Работы на поверхности сводятся к следующему: картированию и изучению характера сдвижения поверхности под влиянием горных выработок; сбору и обработке метеорологических и гидрогеологических данных по району; гидрометрическим наблюдениям за расходами родников, ручьев и речек; наблюдениям за состоянием заболоченных участков, прудов и озер; наблюдением за организованным сбросом шахтных вод и атмосферных осадков в целях недопущения скопления их в понижениях; заделке провальных образований (ям, трещин, котлованов, воронок, старых шурфов и пр.).

В результате проведения длительных гидрогеологических и инженерно-геологических наблюдений на действующих рудниках, шахтах и карьерах собирается чрезвычайно ценный материал, имеющий большое теоретическое и практическое значение. Этот материал является основой для внесения коррективов в действующую дренажную систему, для составления последующих проектов дренажа на новых участках месторождения и прогнозирования гидрогеологических условий на более глубоких горизонтах, проектов осушения месторождений, аналогичных по геологическим, гидрогеологическим и другим природным условиям. Собираемый фактический материал систематически обрабатывают и по нему составляют месячные и годовые отчеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов С. К., Бабушкин В. Д. Методы расчета притока воды к буровым скважинам. М., Стройиздат, 1955.
2. Абрамов С. К., Скиргелло О. Б. Способы, системы и расчеты осушения шахтных и карьерных полей. М., изд-во «Недра», 1968.
3. Адельцин П. Э., Клячко В. А. Опреснение воды. М., Стройиздат, 1968.
4. Белый Л. Д. Теоретические основы инженерно-геологического картирования. М., изд-во «Наука», 1964.
5. Биндеман Н. Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1963.
6. Бондарик Г. К., Комаров И. С. и Ферронский В. И. Полевые методы инженерно-геологических исследований. М., изд-во «Недра», 1967.
7. Бочевер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов. М., изд-во «Недра», 1965.
8. Бочевер Ф. М. Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод. М., изд-во «Недра», 1968.
9. Гавриленко В. М. Фильтры водозаборных, водопонизительных и гидрогеологических скважин. М., Стройиздат, 1968.
10. Горькова И. М. Теоретические основы оценки осадочных пород в инженерно-геологических целях. М., изд-во «Недра», 1966.
11. Инструкция и методические указания по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытных откачек из скважин. Изд-во «Энергия», 1967.
12. Инструкция по инженерным изысканиям для промышленного строительства (СН 225—62, изд. 2). М., Стройиздат, 1964.
13. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1962.
14. Каменский Г. Н., Толстихина М. М., Толстихин Н. И. Гидрогеология СССР. М., Госгеолтехиздат, 1959
15. Кесарев В. В. Движущие силы развития Земли и планет. М., изд-во «Недра», 1967.
16. Климентов П. П. Общая гидрогеология. М., изд-во «Высшая школа», 1962.
17. Климентов П. П., Овчинников А. М. Гидрогеология месторождений твердых полезных ископаемых, ч. 1. М., изд-во «Недра», 1966.
18. Климентов П. П., Сыроватко М. В. Гидрогеология месторождений твердых полезных ископаемых, ч. 2. М., изд-во «Недра», 1966.
19. Климентов П. П. Методика гидрогеологических исследований. М., изд-во «Высшая школа», 1967.
20. Коломенский Н. В., Комаров И. С. Инженерная геология. М., изд-во «Высшая школа», 1964.
21. Коломенский Н. В. Общая методика инженерно-геологических исследований. М., изд-во «Недра», 1968.
22. Круговорот воды. М., изд-во «Знание», 1966.
23. Ларионов А. К. Инженерно-геологическое изучение структуры рыхлых осадочных пород. М., изд-во «Недра», 1966.

24. Ларионов А. К. Занимательная инженерная геология. М., изд-во «Недра», 1968.
25. Лёссовые породы СССР. М., изд-во «Наука», 1966.
26. Методическое руководство по изучению режима подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1954.
27. Методическое руководство по гидрогеологической съемке масштабов 1 : 1 000 000—1 : 500 000—1 : 200 000—1 : 100 000. Госгеолтехиздат, 1961.
28. Методическое руководство по производству гидрогеологической съемки в масштабе 1 : 50 000 и 1 : 25 000. М., Госгеолтехиздат, 1962.
29. Основы геокриологии (мерзлотоведение), ч. 1 и 2. М., изд-во АН СССР, 1959.
30. Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения. Методическое пособие. Под ред. Н. Н. Биндемана. М., изд-во «Недра», 1969.
31. Плотников Н. А. Оценка запасов подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1959.
32. Плотников Н. И. Поиски и разведка подземных вод для целей крупного водоснабжения, ч. 1 и 2. М., изд-во МГУ, 1965, 1968.
33. Попов И. В. Инженерная геология. М., изд-во МГУ, 1959.
34. Прохоров С. П. и Качугин Е. Г. Методическое руководство по гидрогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям при разведке твердых полезных ископаемых. М., Госгеолтехиздат, 1955.
35. Прохоров С. П., Скворцов Г. Г. Временная инструкция по гидрогеологическому и инженерно-геологическому обслуживанию горно-эксплуатационных работ на месторождениях твердых полезных ископаемых. М., изд-во МГиОН СССР, 1960.
36. Радиоизотопные методы исследования в инженерной геологии и гидрогеологии. М., Атомиздат, 1968.
37. Разоренов В. Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М., Стройиздат, 1968.
38. Сергеев Е. М. Грунтоведение. М., изд-во МГУ, 1959.
39. Сергеев Е. М. Современное состояние и перспективы развития инженерной геологии в Советском Союзе. М., изд-во МГУ, 1968.
40. Силин-Бекчурин А. И. Динамика подземных вод. М., изд-во МГУ, 1958.
41. Скворцов Г. Г., Романовская Л. И. Инженерно-геологические исследования и прогнозы при разведке месторождений полезных ископаемых. М., изд-во «Недра», 1966.
42. Смородинов М. И. Радиоизотопы в строительстве фундаментов и подземных сооружений. М., Атомиздат, 1967.
43. Справочник гидрогеолога. М., Госгеолтехиздат, 1962.
44. Справочник по инженерной геологии. М., изд-во «Недра», 1968.
45. Справочное руководство гидрогеолога. Л., изд-во «Недра», 1967.
46. Тезисы докладов межведомственного совещания по инженерной геологии. М., изд-во МГУ, 1968.
47. Технические условия проектирования и сооружения буровых скважин на воду (СН 14—57). М., Госстройиздат, 1958.
48. Трофименков Ю. Г., Воробков Л. И., Смирницкий А. И., Бенедиктов Л. А. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. М., Стройиздат, 1964.
49. Указания по проектированию сооружений для забора подземных вод (СН 325—65). М., Стройиздат, 1966.
50. Федосеев И. А. Развитие знаний о происхождении, количестве и круговороте воды на Земле. М., изд-во «Наука», 1967.
51. Формирование и изменение физико-механических свойств горных пород под влиянием естественных и искусственных факторов (геологических процессов, инженерных сооружений и горных работ). Изд-во Ленинград. НТО горн. 1966.
52. Цытович Н. А. Механика грунтов. М., изд-во «Высшая школа», 1968.
53. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механика грунтов. М., изд-во «Недра», 1966.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение	5
Содержание курса гидрогеологии и инженерной геологии	5
Роль русских и советских ученых в развитии гидрогеологии и инженерной геологии	7
Глава I. Общий круговорот воды в природе	10
§ 1. Современные основы учения о подземной гидросфере	10
§ 2. Роль воды в истории Земли	10
§ 3. Распределение воды в атмосфере, на поверхности Земли и в литосфере	12
§ 4. Баланс вод Земли	15
§ 5. Тепловые условия на Земле	16
Глава II. Вода в атмосфере и на поверхности Земли	18
§ 6. Влажность воздуха	18
§ 7. Испарение	19
§ 8. Атмосферные осадки	20
§ 9. Поверхностный и подземный сток	21
Глава III. Вода в земной коре	24
§ 10. Распределение воды в земной коре	24
§ 11. Виды вод в горных породах	25
Глава IV. Водные свойства горных пород	31
§ 12. Водопроницаемость горных пород	31
§ 13. Влагоемкость пород	32
§ 14. Водоотдача пород	32
§ 15. Прочие водные свойства горных пород	32
Глава V. Физико-механические свойства горных пород	33
§ 16. Главнейшие процессы и факторы формирования физико-механических свойств горных пород	33
§ 17. Показатели физико-механических свойств пород	39
Гранулометрический состав	40
Удельный вес	41
Объемный вес	41
Естественная влажность	42
Пористость	42
Пластичность	42
Консистенция	44
Липкость	46
Набухание и усадка	46
Размокаемость	47

Стр.

Растворимость 48
Размягчаемость 48
Морозоустойчивость 49
Механические свойства 49

Глава VI. **Подземные воды** 55

§ 18. Происхождение подземных вод 55
§ 19. Классификация подземных вод 55

Глава VII. **Физические свойства и химический состав подземных вод** 58

§ 20. Физические свойства подземных вод 58
§ 21. Основные процессы формирования химического состава подземных вод 59
§ 22. Химический состав подземных вод 62
§ 23. Нормы оценки качества воды для питья и технических целей 66

Глава VIII. **Верховодка и грунтовые воды** 70

§ 24. Общие сведения 71
§ 25. Воды зоны аэрации, грунтовые воды и особенности их залегания 71
§ 26. Карты гидроизогипс 72
§ 27. Зональность грунтовых вод 74
§ 28. Основные типы грунтовых вод 75
§ 29. Режим грунтовых вод 77

Глава IX. **Артезианские воды** 78

§ 30. Условия залегания 78
§ 31. Главнейшие артезианские бассейны СССР 80

Глава X. **Подземные воды в трещиноватых и закарстованных породах** 86

§ 32. Трещинные воды 86
§ 33. Карстовые воды 87

Глава XI. **Подземные воды зоны развития многолетнемерзлых пород** 89

§ 34. Общие сведения 89
§ 35. Основные типы подземных вод области многолетнемерзлых пород 91
§ 36. Источники в области распространения многолетнемерзлых пород 93
§ 37. Явления, связанные с многолетнемерзлыми породами . . 94

Глава XII. **Естественные выходы подземных вод** 96

§ 38. Нисходящие источники 97
§ 39. Восходящие источники 98
§ 40. Режим источников 99

Глава XIII. **Подземные минеральные воды и воды нефтяных и газовых месторождений** 99

§ 41. Лечебные минеральные воды 99
§ 42. Промышленные воды 102
§ 43. Термальные воды 102
§ 44. Подземные воды нефтяных и газовых месторождений . . . 103
§ 45. Особенности разведки минеральных вод и вод нефтегазоносных месторождений 111

Глава XIV. **Основные законы движения подземных вод** 112

§ 46. Виды передвижения воды в породах 112
§ 47. Основные законы движения подземных вод 113
§ 48. Коэффициент фильтрации и методы его определения 116

Стр.

§ 49. Определение направления и скорости движения подземных вод 124
§ 50. Движение подземных вод к водозаборным сооружениям . . 127
§ 51. Понятие о взаимодействии водозаборов 131
§ 52. Понятие о методах моделирования при гидрогеологических расчетах 132

Глава XV. **Физико-геологические и инженерно-геологические явления** 133

§ 53. Общие сведения 133
§ 54. Явления, связанные с деятельностью поверхностных вод 134
§ 55. Явления, связанные с деятельностью поверхностных и подземных вод на склонах 136
§ 56. Явления, связанные с промерзанием и оттаиванием пород 143
§ 57. Инженерно-геологическая оценка явлений карста 145
§ 58. Суффозионные процессы 145
§ 59. Плывуны 146
§ 60. Землетрясения 147
§ 61. Инженерно-геологические явления 147

Глава XVI. **Гидрогеологические исследования при поисках и разведке твердых полезных ископаемых** 157

§ 62. Задачи и виды исследований 157
§ 63. Гидрогеологическая съемка 159
§ 64. Поиски и разведка подземных вод для водоснабжения . . 162
§ 65. Понятие о методах подсчета запасов подземных вод 163
§ 66. Охрана подземных вод 165
§ 67. Применение геофизических методов при гидрогеологических исследованиях 166
§ 68. Содержание и объем гидрогеологических и инженерно-геологических исследований для разных стадий разведки месторождений 166

Глава XVII. **Инженерно-геологические исследования** 169

§ 69. Задачи исследований 169
§ 70. Виды работ и их особенности, ... 172
§ 71. Виды и объемы инженерно-геологических исследований для различных видов строительства 185
§ 72. Особенности инженерно-геологических исследований в области развития многолетнемерзлых пород 192

Глава XVIII. **Гидрогеологические исследования и наблюдения в скважинах и горных выработках** 193

§ 73. Гидрогеологические исследования при бурении скважин . . 193
§ 74. Оборудование скважин для опытно-исследовательских работ 197
§ 75. Бесфильтровые скважины 198

Глава XIX. **Условия обводнения горных выработок** 199

§ 76. Основные задачи изучения подземных вод при разработке месторождений 199
§ 77. Факторы, обусловливающие обводнение месторождений . . 200
§ 78. Классификация месторождений по степени обводненности 204

Глава XX. **Гидрогеологические особенности главнейших типов месторождений твердых полезных ископаемых** 206

§ 79. Месторождения в условиях карста 206
§ 80. Соляные месторождения 207
§ 81. Месторождения в рыхлых несцементированных песчано-глинистых породах 208

269

Стр.

§ 82. Месторождения в трещиноватых породах . . . . . .
§ 83. Месторождения в трещиноватых скальных породах, перекрытых рыхлыми осадочными образованиями . . . . . .
§ 84. Месторождения в районах распространения многолетнемерзлых пород . . . . . 2.

Глава XXI. **Химический состав подземных вод месторождений полезных ископаемых** 211

§ 85. Общие сведения 211
§ 86. Подземные воды сульфидных месторождений 212
§ 87. Подземные воды каменноугольных месторождений 214
§ 88. Подземные воды соляных месторождений 215
§ 89. Подземные воды месторождений редких и рассеянных элементов 216
§ 90. Гидрогеохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых 216
§ 91. Методика отбора проб воды в целях изучения газового и химического состава вод 221
§ 92. Использование шахтных и рудничных вод для нужд народного хозяйства 224

Глава XXII. **Определение водопритоков в горные выработки** 225

§ 93. Оценка обводненности месторождений при эксплуатации 225
§ 94. Изменение режима подземных вод и водопритоков в горные выработки 225
§ 95. Определение водопритоков в горные выработки 227

Глава XXIII. **Методы борьбы с подземными и поверхностными водами при подземной разработке месторождений** 230

§ 96. Общие положения 230
§ 97. Значение гидрогеологических данных для размещения горных выработок 230
§ 98. Защита горных выработок от поверхностных вод 231
§ 99. Специальные методы проходки шахтных стволов 231
§ 100. Способы осушения месторождений в процессе эксплуатации 237
§ 101. Проходка горных выработок в области развития многолетнемерзлых пород 246
§ 102. Методы осушения угольных месторождений для подземной газификации 247

Глава XXIV. **Методы борьбы с подземными и поверхностными водами при открытой разработке месторождений** 248

§ 103. Основные задачи открытой разработки 248
§ 104. Поверхностный горизонтальный дренаж 251
§ 105. Отвод русел рек за пределы карьерных полей 25
§ 106. Глубокое водопонижение 25
§ 107. Комбинированное осушение 252
§ 108. Водопонижение горизонтальными и наклонными скважинами 253
§ 109. Понятие об иглофильтровых установках, электроосушении и электрохимическом закреплении глинистых пород 253
§ 110. Дренирование внутренних отвалов и выработанного пространства 257
§ 111. Материалы, необходимые для проектирования осушительных работ 258

Стр.

Глава XXV. **Гидрогеологическая служба на шахтах, рудниках и карьерах** 259

§ 112. Основные задачи гидрогеологической службы 259
§ 113. Составление карт и разрезов 262
§ 114. Наблюдения за рудничным водоотливом и режимом подземных вод 262
§ 115. Наблюдения за деформациями в горных выработках и на поверхности земли 263

Литература 265