В. И. АРАВИН, О. Н. НОСОВА

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ



В. И. АРАВИН, О. Н. НОСОВА

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ

(ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ)

«ЭНЕРГИЯ»
Ленинградское отделение
1969

УДК 628. 365. 001. 5
6С7.5
А79

В книге даны теоретические основы натурных исследований фильтрации грунтовых вод.

Рассмотрены главным образом исследования фильтрации в процессе проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, их оснований и территорий, на которых нарушен естественный режим грунтовых вод. Проведен анализ некоторых характерных случаев аварий гидротехнических сооружений.

Книга предназначена для гидротехников, строителей и гидрогеологов, а также для студентов названных специальностей.

3-2-11
51-68

Аравин Владимир Иванович,
Носова Ольга Николаевна

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ

Редактор *Б. И. Леонова*
Художественный редактор *Г. А. Гудков*
Технический редактор *О. С. Житникова*
Корректор *Т. А. Пак*

Сдано в производство 1/X 1968 г.
Подписано к печати 17/I 1969 г. М 10249. Печ. л. 16. Уч.-изд. л. 17,4. Бум. л. 8. Бумага типографская № 1. Тираж 2400. Заказ 1881. Формат 60×90 1/16. Цена 1 р. 07 к.

Ленинградское отделение издательства «Энергия» Марсово поле, 1

Ленинградская типография № 4 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, Социалистическая, 14.

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы выработалось вполне определенное мнение о первостепенной важности натурных исследований гидротехнических сооружений и, в частности, натурных исследований фильтрации. На различных конференциях, а также на международных конгрессах неоднократно высказывалось мнение о том, что, несмотря на существенные сдвиги в этом вопросе, организация натурных исследований гидросооружений еще не достигла того уровня, который отвечал бы требованиям контроля состояния сооружений и их безопасности.

Печальный опыт разрушений гидросооружений в XIX и начале XX столетия, причинивших громадные убытки и сопровождавшихся гибелью многих людей, показал необходимость организации систематического контроля состояния гидросооружений.

Заметим, что особое внимание заслуживают исследования фильтрации в гидросооружениях и их основаниях. Изучение разрушений гидросооружений приводит к заключению, что около 50% разрушений происходило за счет вредного действия фильтрации. Даже наглядные причины аварий и разрушений, например, оползни берегов и откосов земляных плотин, аварийные осадки сооружений и др., зачастую тесно связаны с фильтрационными явлениями.

Общеизвестна необходимость всесторонних исследований фильтрации в период проектирования сооружений.

За последние годы важное значение придается исследованиям фильтрации в период производства строительных работ. Эти исследования следует считать необходимыми как для временных сооружений в период производства работ (перемычек, котлованов и т. д.), так и для основных возводимых сооружений. В процессе производства работ уточняются фильтрационные характеристики грунта основания, проводятся натурные исследования некоторых элементов сооружения и иногда изменяется конструкция этих элементов.

В связи со сказанным уже с конца прошлого столетия начали проводиться систематические наблюдения за фильтрацией в некоторых гидротехнических сооружениях. Постепенно развивалась методика фильтрационных исследований. В частности,

была существенно развита методика и техника натурных определений скоростей и коэффициентов фильтрации, давлений и т. д. Тем не менее в последние годы все же стала отчетливо ощущаться недостаточность разработанности методики натурных исследований фильтрации, особенно заметная по сравнению с уровнем разработанности методики фильтрационных расчетов. Это объясняется прежде всего резким увеличением масштабов гидротехнического строительства и размеров гидросооружений. Кроме того, практикуется возведение сооружений на основаниях, сложенных суффозионно-неустойчивыми породами, основаниях с интенсивной трещиноватостью и т. д.

Для защиты таких оснований предусматривается комплекс инженерных мероприятий, представляющих собой в ряде случаев принципиально новые решения. Отсюда вытекает необходимость, с одной стороны, практической проверки правильности принятых решений, а с другой — действенного контроля за фильтрационным режимом. Перед исследователями ставится весьма ответственная задача по обычно незначительным и, на первый взгляд, беспорядочно изменяющимся значениям измеряемых параметров уловить направленность и интенсивность закономерно развивающихся процессов. Для решения этих задач приходится разрабатывать отдельные методические вопросы применительно к данным конкретным условиям.

Накопленный опыт наблюдений за жизнью гидротехнических сооружений позволяет классифицировать отклонения фильтрации от нормального расчетного режима и объяснить эти отклонения физическими причинами.

Именно эти задачи поставлены в данной книге.

Исходя из практики натурных исследований фильтрации, а также из личного опыта работы в этом направлении во ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева, авторы считают единственно правильным сочетание натурных наблюдений за фильтрацией с экспериментальными исследованиями в лаборатории и в натурных условиях. Только при таком комплексе исследований возможен правильный анализ режима фильтрации. Под таким углом зрения написана данная книга.

Весьма большое разнообразие видов гидротехнических сооружений, а также их обычно резко выраженная индивидуальность даже в пределах одного и того же типа сильно затрудняют изложение. Поэтому авторы приводят список использованных ими литературных источников, в которых читатель найдет более детальное освещение отдельных вопросов.

Критические замечания по работе следует направлять в Ленинградское отделение издательства «Энергия» по адресу: Ленинград, Д-41, Марсово поле, д. 1.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ФИЛЬТРАЦИИ

§ 1-1. Основные задачи натурных исследований фильтрации

Исследования фильтрации грунтовых вод в натурных условиях весьма разнообразны и имеют различные цели. Основной задачей таких исследований является изучение режима подземных вод. Сюда относится изучение форм подземных потоков и их характеристик, т. е. скоростей, расходов, давлений в различных точках проницаемой среды и т. д., в процессе изменения этих форм и характеристик под влиянием различных естественных и искусственных факторов.

Другой важнейшей задачей является определение фильтрационных характеристик фильтрующей среды. Сюда относится определение проницаемости рыхлых или трещиноватых горных пород и искусственных фильтрующих сред: бетонных и земляных сооружений, цементационных завес и т. д. К названным характеристикам относятся также коэффициенты водоотдачи и недостатка насыщения, играющие существенную роль при расчетах неустановившейся фильтрации грунтовых вод.

Несколько особо стоит важная проблема изучения в натурных условиях механического и химического воздействия фильтрации грунтовых вод на горные породы и тело сооружений.

Если первые две из названных проблем изучались еще в прошлом столетии, то последняя проблема возникла лишь в последние годы в связи с возведением гидротехнических сооружений на основаниях, подверженных механическому вымыву частиц грунта под воздействием фильтрации (механической суффозии) или же растворению и выносу в форме раствора потоком грунтовых вод (химической суффозии).

Вопросы натурных исследований фильтрации, входящие в состав названных проблем, в зависимости от назначения исследований и от природных условий, решаются различными методами.

Особенно широкий круг вопросов натурных исследований фильтрации возникает в связи с проектированием, строительством и эксплуатацией гидротехнических узлов. Гидроузлы включают в себя весьма разнообразные гидротехнические сооружения, как-то: земляные и бетонные плотины, гидроэлектростанции, судоходные шлюзы, деривационные каналы, различные типы дренажных сооружений и т. д.

Для контроля условий работы этих сооружений организуются соответствующие натурные наблюдения, которые в зависимости от целей исследований осуществляются систематически или эпизодически.

Основными задачами натурных исследований в стадии проектирования гидротехнических сооружений являются изучение режима грунтовых вод в районе строительства, определение коэффициентов фильтрации пород и дебитов источников. Иногда также определяются еще химический состав грунтовых вод, газосодержание, а также способность пород к водоотдаче и к водонасыщению.

В процессе производства работ к перечисленным задачам натурных исследований фильтрации еще добавляется необходимость определения качества строительных работ и эффективности принятых инженерных мероприятий, как-то: исследований фильтрации в намывных плотинах и дамбах, водопроницаемости противофильтрационных завес и эффективности дренажных устройств.

В задачи натурных исследований при эксплуатации сооружений входит контроль состояния пород основания, изучение влияния построенного сооружения на фильтрационный режим и определение наиболее рациональной эксплуатации дренажных устройств. С этой целью определяют форму свободной поверхности потока, потери на фильтрацию, эффективность работы противофильтрационных устройств, изучают механическую и химическую суффозии и т. д. Результаты наблюдений сопоставляются также с результатами проектных проработок, что позволяет оценить точность расчетов и в случае необходимости внести в них соответствующие коррективы.

На Пятом международном конгрессе по большим плотинам (1955 г.) в одном из докладов была высказана мысль о том, что непрерывные активные мероприятия, проводимые в процессе эксплуатации сооружений, часто являются более важными, чем первоначальные проектные. Тем самым подчеркивается важное значение систематических наблюдений за сооружениями, из которых каждое имеет свои особенности, накладывающие отпечаток на характер эксплуатации.

Некоторый застой в области систематического развития теории и методологии натурных исследований фильтрации, отмеченный на ряде международных конгрессов, помимо недостаточного внимания к этому вопросу, объясняется еще и тем, что

натурными исследованиями до настоящего времени обычно занимались эпизодически, под влиянием обстоятельств. Между тем, с точки зрения развития науки и возможности предвидения, необходимо, наряду с исследованиями, осуществляемыми применительно к отдельным объектам, проводить работу по обобщению материала с целью определения общих закономерностей для процессов фильтрации, протекающих одинаково в различных сооружениях.

Роль натурных наблюдений за фильтрацией в отношении оценки работы сооружений и предотвращения их аварий весьма существенна. Однако один фактический материал, например графики показаний пьезометров без соответствующей обработки, еще не характеризует условий работы сооружения. Равным образом такой материал не определяет причины нарушения нормальной работы сооружения. Для решения этих вопросов необходимо провести теоретический анализ результатов наблюдений.

Очевидно, что для проведения анализа состояния сооружений необходимо иметь ясные представления о методах обработки данных натурных наблюдений. Методика обработки данных натурных исследований фильтрации так же, как и анализ состояния сооружений, основана на теории фильтрации. Поэтому при проведении натурных исследований фильтрации необходимо иметь предварительные теоретические соображения о режиме грунтовых вод изучаемого объекта. В своей основе эти соображения являются результатом предварительных, хотя бы ориентировочных расчетов или же представлений, полученных из опытов и сопоставлений с аналогами. Отсюда вытекает необходимость знания теоретических основ натурных исследований фильтрации.

В настоящее время вопросы натурных исследований фильтрации приобретают все большее значение. В СССР на всех крупных гидроузлах персоналом гидроцехов производятся систематические наблюдения за режимом грунтовых вод. В ряде случаев к натурным исследованиям новых крупных гидроузлов, а также гидроузлов, в которых замечаются отклонения от нормального режима фильтрации, привлекаются научно-исследовательские организации. Они привлекаются также с целью проверки расчетных способов и предложений при помощи анализа натурных материалов, что имеет большое методологическое значение в области гидротехнического проектирования и строительства.

В литературе можно встретить работы, содержащие некоторые результаты натурных исследований фильтрации ряда всесоюзных и республиканских институтов — гидротехнических, гидрогеологических, мелиоративных и т. д. Имеются некоторые общие соображения о составе натурных исследований фильтрации

на разных объектах [43, 101, 171, 172], а также монографии, посвященные натурным исследованиям реальных объектов [52, 74, 82, 187].

§ 1-2. Связь натурных исследований фильтрации с исследованиями теоретически-экспериментальными

Натурные исследования фильтрации являются одним из звеньев ее изучения в реальных условиях. Будучи основанными на теоретических предпосылках, натурные исследования являются важнейшим критерием правильности теоретических положений и решений. При этом необходимо, конечно, иметь в виду многообразие определяющих режим подземных вод природных факторов, которые не могут быть полностью учтены при теоретических решениях задач фильтрации.

Роль теоретических предпосылок была ясна в самом начале постановок натурных исследований фильтрации. Но по мере того, как развивались и усложнялись натурные исследования, увеличивалось значение экспериментальных лабораторных исследований, производимых в помощь натурным. В настоящее время многие вопросы натурных исследований фильтрации не могут быть удовлетворительно решены без помощи лабораторного эксперимента с соответствующим теоретическим анализом. С этой точки зрения можно говорить о комплексном методе натурных исследований фильтрации, подразумевая под этим органически связанные единым планом исследования фильтрации в натуре и на лабораторных установках.

Остановимся на наиболее распространенных случаях применения комплексного метода.

Прежде всего отметим, что при проектировании пьезометрической сети до возведения сооружений необходимо заранее иметь количественное и качественное представления о форме грунтового потока, так как иначе распределение пьезометров в плане и их заглубление могут оказаться неправильными. Для этого требуется предварительное исследование формы грунтового потока, например, по методу электрогидродинамической аналогии (ЭГДА). Иногда исследования фильтрации по методу ЭГДА или при помощи интеграторов успешно дополняют и детализируют натурные исследования. Такие случаи встречаются при построении плана гидроизогипс грунтовых потоков, когда этот план не может быть детально построен на основании показаний пьезометров. Если на большой территории имеется лишь несколько наблюдательных скважин, то для заданных граничных условий можно построить карты гидроизогипс или гидроизопьез при помощи метода ЭГДА или интеграторов.

Так, например, на строительстве плотины Бин Эль-Уидан в Марокко при создании цементационной завесы в береговом

примыкании плотины, наряду с обработкой показаний пьезометров, характеризующих изменение уровней грунтовых вод в натуре, проводились экспериментальные исследования при помощи метода ЭГДА [134]. Эти исследования позволили установить место и влияние разрыва в завесе на фильтрационный расход и форму грунтового потока в примыкании плотины, что имело существенное значение при дополнительных цементационных работах.

Другая задача исследовалась в связи с наблюдаемым повышением кривой депрессии на некотором участке Каховской земляной плотины. При помощи метода ЭГДА по данным натурных наблюдений было установлено влияние шпунтовой перемычки с отсыпкой из горной массы, оставленной в теле плотины при производстве работ [91]. До выполнения этих исследований предполагалось, что повышение кривой депрессии в плотине обусловлено зарилением обратного фильтра.

При натурных исследованиях земляных плотин Горьковского гидроузла, проводимых ВНИИГ, данные натурных наблюдений проверялись методом ЭГДА, причем была выявлена некоторая неточность построения кривой депрессии в отдельных створах по показаниям пьезометров. Тем же методом в связи с явлениями суффозии были определены градиенты напора в зонах выхода грунтовых вод из тела плотины.

Для определения коэффициента фильтрации можно использовать любую схему, отвечающую условиям фильтрации на изучаемом объекте: дрену, колодец, грунтовое русло и т. д. Если такая схема не имеет теоретического решения, то его можно получить, например, по методу ЭГДА, воспроизведя на модели натурные условия, схематизированные соответствующим образом. Из опытов получаются значения Q/k, где Q — фильтрационный расход; k — коэффициент фильтрации. Имея замеренный в натуре расход Q, определяем коэффициент фильтрации.

В процессе натурных исследований суффозии в построенных земляных сооружениях и основаниях сооружений требуется иногда проведение целого комплекса лабораторных исследований грунтов, взятых из зон, подверженных суффозии, и из обратных фильтров. Сюда относятся исследования гранулометрического состава грунтов, их водопроницаемости и суффозионных свойств. Аналогичные лабораторные исследования могут сопутствовать натурным исследованиям естественной и искусственной кольматации грунтов гидротехнического сооружений и их оснований.

Натурные наблюдения за фильтрацией большей частью имеют стационарный характер. Определенный объект ставится под систематический контроль при помощи наблюдений за уровнями пьезометров, расходами, химическим и газовым составом воды и т. д. Эти наблюдения производятся по специальным

инструкциям [147, 165] и др. Они не исключают необходимости натурных наблюдений экспериментального характера, например, при исследовании причин резкого нарушения режима фильтрации. В подобных случаях при составлении программ наблюдений и исследований также следует проанализировать теоретически условия фильтрации, а иногда привлечь и лабораторный эксперимент. Результаты натурных исследований совместно с данными эксперимента после соответствующей обработки, основанной на теоретических положениях, дают возможность сделать качественные и количественные выводы и определить закономерности явлений фильтрации в данном объекте.

Таким образом, натурные наблюдения за фильтрацией являются важнейшей частью натурных исследований фильтрации, включающих в себя теоретический анализ и лабораторный эксперимент.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

§ 2-1. Основные положения

При проведении натурных исследований фильтрации весьма существенную роль играют фильтрационные расчеты. Часто только с помощью расчета можно произвести анализ данных опыта, сделать соответствующие выводы о состоянии сооружений и необходимости осуществления защитных мероприятий. Иногда расчет помогает оценить ту или иную гипотезу о состоянии водопроницаемой породы и самого сооружения, подверженного воздействию фильтрации. Разумеется, фильтрационные расчеты необходимы при определении коэффициента фильтрации грунта, при разработке прогнозов режима грунтовых вод и вообще при анализе и обработке данных натурных исследований. Следует подчеркнуть, что и для составления рациональной программы натурных исследований необходимо произвести ряд предварительных расчетов фильтрации применительно к данным природным условиям.

За основу теории фильтрации принимается статистический метод, поскольку форма и размеры частиц грунта, а также трещин в скальных породах настолько незакономерны, что о фильтрационных свойствах водопроницаемых пород можно судить лишь по осредненным характеристикам. Равным образом при экспериментальном изучении фильтрации затруднительно или невозможно судить о форме движения воды в порах или трещинах, а приходится определять осредненные характеристики потока, т. е. скорости, давления, расходы и т. д. Эти характеристики мы определяем, отвлекаясь от форм пор или трещин, относя их к площадкам, размеры которых малы по сравнению с общими размерами изучаемой области фильтрации, но достаточно велики по сравнению с размерами пор или трещин, по которым движется вода. Имея в виду такие элементы, можно говорить о некоторой средней скорости движения воды в порах или трещинах, постоянной в пределах данной площадки. Эта средняя скорость u равна действительному расходу воды, протекающей через данную площадку, поделенному на площадь сечения всех пор или трещин на площадке.

В практике натурных исследований могут встретиться случаи, когда движение воды происходит по очень крупным трещинам или карстам, носящим индивидуальный характер. Тогда, конечно, уже нельзя пользоваться указанной выше теоретической схемой, и элементы потока в этих образованиях следует определять, пользуясь известными гидравлическими способами.

Необходимо подчеркнуть, что фильтрационные расчеты, заключающиеся в определении характеристик и форм грунтовых потоков, основываются не только на зависимостях, выведенных чисто теоретическим путем. Не говоря уже о том, что зачастую формулы, используемые при расчетах, получены

экспериментально, в ряде случаев при расчете фильтрации целесообразно использовать экспериментальные методы и моделирующие устройства. Так, применение при расчетах метода ЭГДА может весьма значительно повысить точность результатов. При исследовании неустановившейся фильтрации, как показывает опыт, полезно применять такие моделирующие устройства, как гидравлический интегратор или электроинтеграторы, получившие в настоящее время достаточно широкое распространение в СССР и за границей. В последние годы при проведении фильтрационных расчетов в сложных случаях применяются электронно-вычислительные машины.

Приводимые в этой главе данные носят предельно краткий, справочный характер и касаются тех вопросов, которые, как полагают авторы, имеют непосредственное отношение к обычно проводимым натурным исследованиям фильтрации.

Литература по теории фильтрации и по фильтрационным расчетам достаточно известна и обширна. Так, имеются труды по теории фильтрации акад. Н. Н. Павловского [125], капитальная монография акад. П. Я. Полубариновой-Кочиной [129], Г. Н. Каменского [70], В. И. Аравина и С. Н. Нумерова [11, 12]. Имеется ряд монографий с уклоном в сторону гидрогеологических расчетов: Ф. М. Бочевера, И. В. Гармонова, А. В. Лебедева, В. М. Шестакова [25], А. Н. Силина-Бекчурина [157] и др. Названные монографии составлены по довольно широким программам, но есть монографии, посвященные отдельным разделам теории фильтрации, например притоку грунтовых вод к колодцам, дренам, фильтрации из каналов и т. д. Ряд таких работ, как, например, работы С. Ф. Аверьянова, Н. Н. Веригина, Н. К. Гиринского, А. А. Угинчуса, В. Н. Щелкачева, И. А. Чарного и других ученых, в той или иной степени был использован в соответствующих параграфах данной книги.

§ 2-2. Характеристика водопроницаемых грунтов

Водопроницаемые грунты (горные породы) бывают весьма разнообразны. Существует несколько классификаций грунтов. С точки зрения изучения фильтрации грунты можно подразделить на зернистые и трещиноватые. Экспериментальным путем установлено, что частицы зернистых песчаных грунтов являются остроугольными, либо более или менее округленными. Частицы глинистых грунтов обычно представляют собой вытянутые чешуйки или пластинки с краями неправильной формы.

Имеется ряд классификаций грунтов по крупности частиц. Частицы крупностью менее 0,005 *мм* обычно относят к глинистым, от 0,005 до 0,05 *мм* — к пылеватым, от 0,05 до 2,0 *мм* — к песчаным. По мере дальнейшего возрастания крупности частиц различают гравий, гальку, валуны.

Большей частью грунт состоит из частиц весьма различных размеров. Состав грунта характеризуется кривой гранулометрического анализа (рис. 2-1). На этой кривой по оси абсцисс откладывается обычно в логарифмическом масштабе диаметр частиц грунта, а по оси ординат — соответствующие процентные отношения суммарного веса частиц, меньших данного диаметра, к весу всего исследуемого образца грунта. На кривой гранулометрического анализа имеется ряд точек, приближенно характеризующих фильтрационные свойства грунта. Одна из таких точек определяет диаметр фракции, меньше которой в грунте содержится 10% зерен по весу; этот диаметр d_{10} называется действующим или эффективным диаметром (рис. 2-2). Контролирующим диаметром d_{60} называется диаметр фракции, меньше которой в грунте содержится 60% частиц. Имеются и другие характерные диаметры, например d_{17}, представляющий собой диаметр фракции, меньше которой в грунте содержится 17% частиц. Этот диаметр фигурирует в некоторых новых формулах для определения коэффициента фильтрации.

Все эти характеристики имеют значение при определении фильтрационных и суффозионных свойств грунтов. Отношение $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ называется коэффициентом разнозернистости или неоднородности грунта. При вполне

однородном грунте этот коэффициент равен единице. Имеются разнозернистые грунты, для которых коэффициент разнозернистости выражается десятками, а в случаях песчано-галечных грунтов может достигать 100 и более.

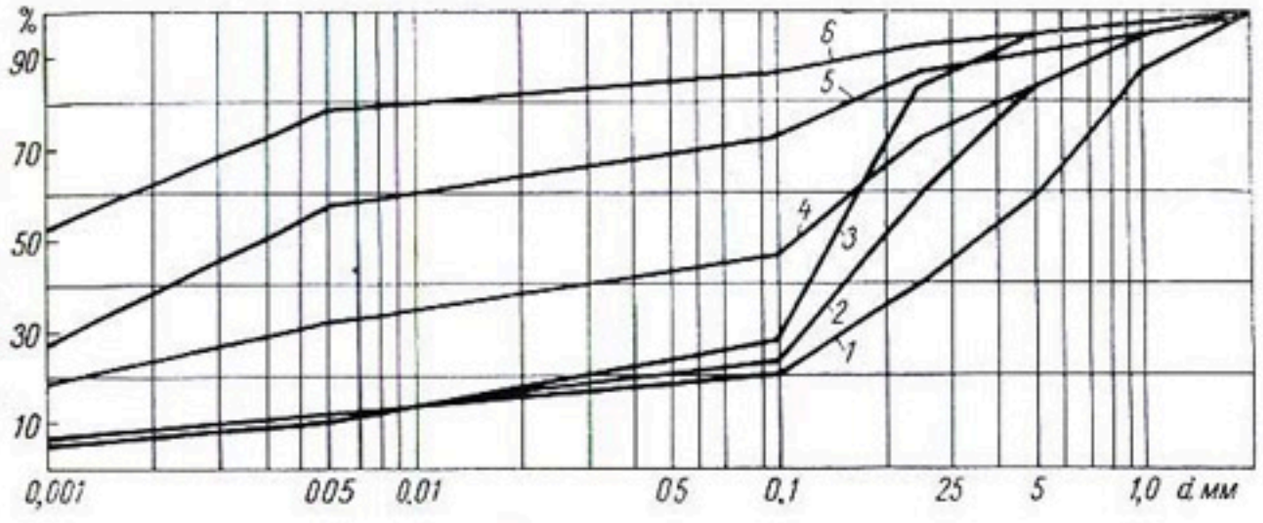


Рис. 2-1. Кривые гранулометрического анализа грунтов.
1 — крупный песок; *2* — песок; *3* — мелкий песок; *4* — песчаный суглинок; *5* — суглинок; *6* — глина.

Неплотно прилегающие друг к другу частицы грунта образуют свободное пространство — поры, которые могут быть полностью или частично заполнены водой. Под действием разности напоров вода в порах может прийти в движение, и тогда происходит фильтрация. Отношение объема пор V' к общему объему образца грунта V, состоящему из объемов пор и частиц, называется пористостью грунта m:

$$m = \frac{V'}{V}. \qquad (2\text{-}1)$$

Пористость часто выражается в процентах. Она определяется экспериментальным путем [27].

Если бы грунт состоял из частиц шарообразной формы, то, в зависимости от характера относительного расположения шаров, пористость могла бы изменяться в пределах от $m=0{,}259$ до $m=0{,}476$. В действительности грунт состоит из частиц неправильной формы и разнообразных размеров. Поэтому пористость естественных грунтов изменяется в более широких пределах обычно от 0,3 у гравия до 0,6—0,8 у торфяных грунтов.

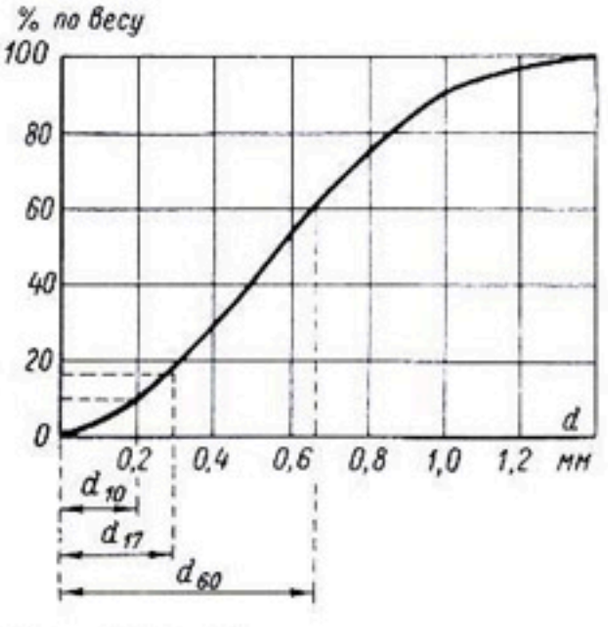


Рис. 2-2. Характерные диаметры фракций грунта.

Пористость глинистых грунтов сильно зависит от их уплотнения. При значительном уплотнении глинистых грунтов значение их пористости сильно уменьшается. Зависимость между пористостью и давлением для глинистых грунтов определяется при помощи экспериментально полученных компрессионных кривых.

В трещиноватых горных породах фильтрация происходит по трещинам [1], имеющим весьма разнообразные размеры и формы. При рассмотрении

[1] В некоторых породах фильтрация происходит как по трещинам, так и по порам, расположенным между трещинами.

фильтрации в трещиноватых породах вводится понятие коэффициента трещиноватости. Коэффициент трещиноватости определяется как отношение объема трещин породы ко всему объему образца.

Некоторые авторы считают, что в отличие от пористости, трещиноватость не может быть охарактеризована одним коэффициентом и для этой цели должны быть учтены три параметра, характеризующих раскрытие трещин, их ориентировку и объемную плотность [145].

§ 2-3. Характеристика воды в грунте

Вода в порах грунта может находиться в различных состояниях: в виде пара, в виде связанной воды, окружающей частицы грунта тончайшим слоем, удерживаемым притяжением частиц, в виде капиллярной воды, заполняющей поры или мелкие трещины, находящейся в условиях преобладающего действия сил поверхностного натяжения (капиллярных сил), в виде гравитационной или свободной воды, движение которой происходит под влиянием сил тяжести. В обычных случаях практики встречается фильтрация воды гравитационной и капиллярной.

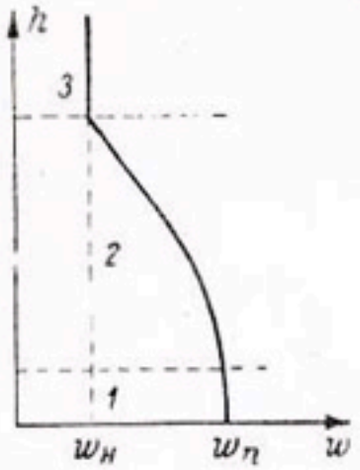


Рис. 2-3. Распределение влагосодержания по высоте пласта.

1 — зона грунтовой воды; *2* — капиллярная зона; *3* — зона наименьшей влагоемкости.

При движении гравитационной воды связанная вода остается в покое, уменьшая объем пор, по которым происходит фильтрация. Отсюда возникло понятие эффективной или активной пористости, под которой понимается отношение порового пространства, занятого движущейся жидкостью, к полному объему грунта. Эффективная пористость всегда меньше пористости m. Для крупнозернистых грунтов разница между пористостью и эффективной пористостью ничтожно мала.

Капиллярная вода образует над свободной поверхностью грунтовых вод капиллярную зону, называемую капиллярной каймой. Давление на поверхности грунтовой воды равно атмосферному $p_а$. В капиллярной же зоне давление меньше атмосферного. В верхних точках капиллярной каймы (под менисками) давление

$$p = p_а - \gamma h_к, \tag{2-2}$$

где $h_к$ — высота капиллярного поднятия; γ — удельный вес жидкости. Высота капиллярного поднятия зависит от размеров и формы пор грунта, а также от свойств жидкости и материала пор и определяется лабораторными или полевыми способами. Влагосодержание капиллярной каймы изменяется по ее высоте. В нижней части каймы воздух может полностью отсутствовать. Однако в верхней ее части имеются воздушные полости. Распределение влагосодержания грунта над поверхностью грунтовой воды приведено на рис. 2-3. В капиллярной зоне влагосодержание w изменяется в пределах от полной влагоемкости до наименьшей влагоемкости или максимальной молекулярной влагоемкости $w_п$.

При изменении уровня грунтовых вод в процессе фильтрации капиллярная кайма деформируется и также изменяет свою форму кривая влагосодержания $w = f(h)$. В зоне наименьшей влагоемкости содержание влаги определяется количеством связанной воды, удерживаемой сорбционными силами, и некоторым количеством капиллярной воды в уголках пор. Таким образом, при понижении уровня грунтовых вод освобождается часть пространства, занимаемого порами. Отношение объема вытекшей под действием сил тяжести воды V'' к общему объему грунта V называется коэффициентом водоотдачи грунта

$$m_0' = \frac{V''}{V}. \tag{2-3}$$

Коэффициент водоотдачи является физической характеристикой грунта и в неизменных температурных условиях будет постоянной величиной для данного грунта. В зависимости от поставленной задачи коэффициент водоотдачи может иметь разные толкования (см. главу 6).

При подъеме уровня грунтовых вод вода заполняет лишь объем пор, который оставался свободным в момент насыщения его поднимающейся водой. Отношение свободного объема пор к общему объему грунта называется коэффициентом недостатка насыщения грунта. Этот коэффициент аналогичен коэффициенту водоотдачи и обычно принимается численно равным ему.

Запасы грунтовой воды в пласте могут пополняться за счет просачивания воды с поверхности земли. Такой процесс просачивания называется инфильтрацией. Инфильтрация обусловливается как естественными факторами — атмосферными осадками, так и искусственными — поливами и т. д. Интенсивность инфильтрации характеризуется величиной расхода воды, просачивающейся с единицы площади поверхности земли. Эта величина, обозначаемая ε, имеет размерность скорости. Интенсивность испарения характеризуется величиной расхода воды, испаряющейся с единицы площади поверхности земли. Эта величина, обозначаемая также ε, в уравнениях фильтрации отличается от интенсивности инфильтрации только знаком.

§ 2-4. Законы сопротивления при фильтрации

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, аналитическое выражение закона сопротивления при фильтрации зависит от значения скорости фильтрации, вязкости жидкости и размеров пор. Наиболее простое выражение искомой расчетной зависимости получается при достаточно малых скоростях фильтрации. В этих случаях имеет место линейная зависимость между скоростью фильтрации и градиентом напора — закон Дарси.

Согласно закону Дарси, потери напора при фильтрации линейно зависят от скорости фильтрации:

$$v = kI, \tag{2-4}$$

где v — скорость фильтрации; k — коэффициент фильтрации, имеющий размерность скорости; I — пьезометрический уклон (градиент напора):

$$I = \frac{h_w}{l}, \tag{2-5}$$

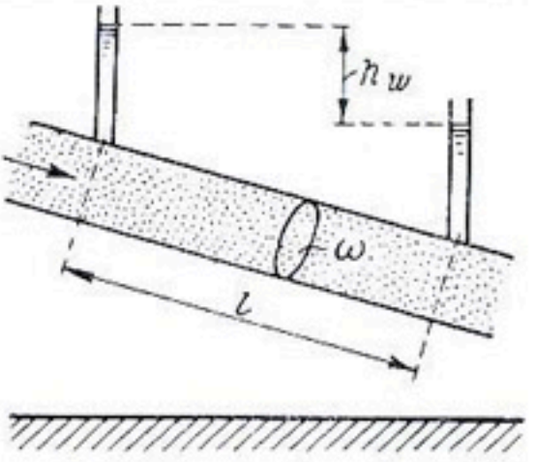


Рис. 2-4. Схема фильтрации в цилиндрической трубе.

где h_w — потери напора на участке длиной l (рис. 2-4).

Фильтрационный расход

$$Q = k\omega I, \tag{2-6}$$

где ω — площадь сечения трубы.

При изучении фильтрации жидкостей, отличных от воды, например раствором солей, что иногда встречается в практике натурных исследований фильтрации, удобно характеризовать фильтрационные свойства пористой среды независимо от рода жидкости. Для этого зависимость (2-4) представляется в виде:

$$v = \frac{c\gamma}{\mu} I = \frac{cg}{\nu} I, \tag{2-7}$$

где γ — удельный вес жидкости; μ — коэффициент вязкости жидкости; ν — кинематический коэффициент вязкости; g — ускорение силы тяжести; c —

коэффициент проницаемости пористой среды, имеющий размерность площади. Он определяется величиной и формой частиц грунта, а также их взаимным расположением, иначе говоря, зависит от характера поровой структуры грунта. Между коэффициентами фильтрации и проницаемости, как это следует из формул (2-4) и (2-7), имеется следующая связь:

$$k = \frac{c\gamma}{\mu} = \frac{cg}{\nu}. \tag{2-8}$$

В технической системе единиц коэффициент проницаемости изменяется в квадратных сантиметрах. Практически чаще всего, в особенности при изучении фильтрации нефти, он выражается в специальных единицах, называемых дарси, причем $1\ см^2 = 0{,}981 \cdot 10^8$ *дарси*.

Если c выражено в дарси, а кинематический коэффициент вязкости ν в стоксах, то

$$k = 10^{-5}\,\frac{c}{\nu}\ [см/сек]. \tag{2-9}$$

Если известен коэффициент фильтрации k_1 применительно к жидкости с кинематическим коэффициентом вязкости ν_1, то для того же грунта коэффициент фильтрации k_2 применительно к жидкости с кинематическим коэффициентом вязкости ν_2 будет

$$k_2 = \frac{\nu_1}{\nu_2}\,k_1. \tag{2-10}$$

Закон Дарси находит вполне удовлетворительное теоретическое объяснение при малых скоростях фильтрации, т. е. при тех условиях обтекания частиц грунта, когда силами инерции можно пренебрегать. Как известно, в названных условиях течения жидкости отношение силы инерции к силе трения мало, иначе говоря, мало число Рейнольдса. Аналогично формуле Стокса для силы сопротивления движения шара в вязкой жидкости закон Дарси имеет место только при достаточно малых числах Рейнольдса. Таким образом, мы приходим к понятию о пределе применимости закона Дарси. Впервые критерий применимости закона Дарси, основанный на числе Рейнольдса, предложил в 1922 г. Н. Н. Павловский [125].

Позднее этим вопросом занимались многие исследователи. Наиболее обоснованное выражение для данного критерия было получено Энгелундом [208].

Опытные данные показывают, что отклонение от закона Дарси при увеличении числа Рейнольдса выше некоторого критического значения происходит медленно, но вопрос о величине ошибки, которая будет иметь место при пользовании законом Дарси в этой области в настоящее время не исследован с достаточной надежностью. Отклонения от закона Дарси при малых числах Рейнольдса еще не свидетельствуют о переходе к турбулентному режиму. Турбулентный режим фильтрации возникает при числах Рейнольдса, во много раз больших тех «критических» значений, при которых наблюдаются отклонения от закона Дарси.

Теоретические расчеты и практика натурных исследований показывают, что в подавляющем большинстве случаев фильтрации в гидротехнических сооружениях, их основаниях, а также на обширных территориях, находящихся в зонах подпора грунтовых вод от гидротехнических сооружений, закон Дарси имеет место. Во многих случаях фильтрация в трещиноватых горных породах также происходит по линейному закону. Это обстоятельство имеет весьма важное значение, так как линейный закон фильтрации позволяет получить дифференциальные уравнения, интегрирование которых возможно во многих практически интересных случаях фильтрации. Для ряда задач, не поддающихся точному решению, закон Дарси позволяет получить экспериментальные решения при помощи достаточно простых способов моделирования фильтрации.

Остановимся на выражениях закона фильтрации за пределами применимости закона Дарси. Можно отметить два наиболее известных выражения этого закона. Первое выражение, получившее некоторое распространение, имеет показательную форму:

$$v = KI^{\frac{1}{n}}, \tag{2-11}$$

где K и n — фильтрационные характеристики, причем величина K аналогична коэффициенту фильтрации. Показатель n в зависимости от изменения числа Рейнольдса меняется в пределах от единицы до двух. Первое его значение соответствует малым числам Рейнольдса и превращает выражение (2-11) в закон Дарси. При $n=2$ происходит турбулентная фильтрация при квадратичном законе сопротивления. Турбулентная фильтрация имеет место, например, в каменной наброске.

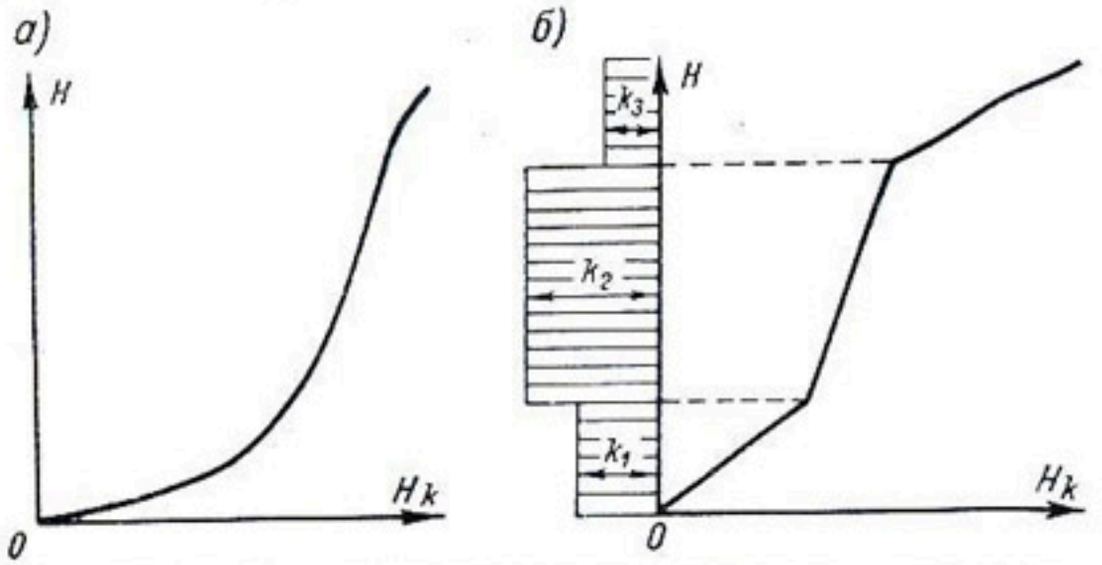


Рис. 2-5. Графики водопроводимости пластов: *а* — при плавном и *б* — при прерывном изменении коэффициента фильтрации

Заштрихована эпюра коэффициента фильтрации.

Показательный закон фильтрации не может быть обоснован теоретически, а практическое пользование им во многих случаях представляется неудобным, так как при существенных изменениях скорости фильтрации в одном и том же потоке даже при однородном грунте показатель n может изменяться в значительных пределах. Наиболее оправданной теоретически и экспериментально является двучленная форма закона фильтрации:

$$I = Av + Bv^2, \tag{2-12}$$

где A и B — фильтрационные характеристики, зависящие от пористости и формы частиц грунта, а также от свойств жидкости. Теоретически формула (2-12) была подтверждена С. Иремеем [34]. Как показывают исследования, зависимость (2-12) хорошо охватывает фильтрацию в трещиноватых породах [89].

Остановимся теперь на других фильтрационных характеристиках. При исследовании плавно изменяющихся фильтрационных потоков целесообразно пользоваться характеристикой, называемой водопроводимостью. Водопроводимостью безнапорного пласта на данной вертикали называется величина

$$H_k = \int_{h-H}^{h} k\,dz, \tag{2-13}$$

где z — вертикальная координата; k — переменный коэффициент фильтрации; h — напор на данной вертикали; H — глубина потока.

Если водоносный пласт состоит из ряда слоев с различными значениями коэффициента фильтрации, то

$$H_k = \sum_{i=1}^{n} k_i T_i, \tag{2-14}$$

где z — число слоев; T_i и k_i — мощность и коэффициент фильтрации i-го слоя.

На рис. 2-5 показан график водопроводимости пласта в зависимости от глубины H. Он представлен в виде ломаной линии, точки перелома которой соответствуют контактным поверхностям слоев.

При однородном по проницаемости пласте

$$H_k = kH. \tag{2-15}$$

Заметим, что обычно водопроводимость пласта при переходе от одной вертикали, проведенной в потоке, к другой изменяется довольно медленно. Резкое изменение H_k по горизонтальным координатам потока происходит при резком изменении литологического состава водоносной толщи.

В некоторых уравнениях неустановившейся фильтрации фигурируют отношения коэффициента фильтрации к поверхностному коэффициенту водоотдачи k/m' или H_k/m', характеризующие скорость распространения изменения напора в водоносном пласте. Эти отношения называются соответственно коэффициентом уровнепроводности и коэффициентом уровнепроводность пласта. В случае напорных потоков отношение H_k/m' называется коэффициентом пьезопроводности пласта [120]. Более подробные сведения об этих коэффициентах приведены в главе 6.

§ 2-5. Общие сведения об определении фильтрационных характеристик грунтов

Основной фильтрационной характеристикой грунтов является коэффициент фильтрации. Напомним, что погрешность при определении фильтрационного расхода в земляных сооружениях и основаниях гидротехнических сооружений практически равна погрешности при определении коэффициента фильтрации. Погрешность при вычислении коэффициента фильтрации отдельных слоев слоистых пластов влечет за собой погрешности при определении форм кривых свободной поверхности эпюр давления, градиентов напора и т. д.

Коэффициент фильтрации определяется одним из следующих способов:

1) по формулам, в которые входят данные гранулометрического анализа грунта;

2) экспериментально, путем исследования образцов грунта на различных фильтрационных приборах, в лабораторных условиях;

3) путем исследования фильтрации в натурных условиях.

Определению коэффициента фильтрации в натурных условиях посвящена глава 5. Здесь же отметим, что натурные определения коэффициента фильтрации являются наиболее распространенными. Они требуют значительных затрат, но полученные результаты обычно более точны и надежны, чем результаты изучения коэффициента фильтрации другими способами. Вследствие этого натурные определения коэффициента фильтрации широко применяются в настоящее время при проектировании гидротехнических сооружений, а также при их эксплуатации. Они составляют необходимую часть гидрогеологических исследований района строительства.

Определения коэффициента фильтрации по данным гранулометрического анализа и экспериментальным способом на приборах дают приближенные значения коэффициента фильтрации, причем они применяются главным образом для песчаных грунтов. Лабораторный способ часто используется при определении коэффициента фильтрации грунта как строительного материала при сооружении земляных плотин, перемычек, обратных фильтров и т. д.

Остановимся на способе определения коэффициента фильтрации по данным гранулометрического анализа. В этих случаях обычно используется формула, вытекающая из (2-8) и из соображений о размерности коэффициента c:

$$k = \frac{c_0 g}{\nu} d^2 = Ad^2, \tag{2-16}$$

где d — расчетный диаметр частиц грунта; c_0 — безразмерный коэффициент, зависящий от пористости и формы частиц.

Коэффициент A в формуле (2-16) определяется по-разному [88]. Вообще говоря, он зависит от пористости, от формы частиц грунта, от коэффициента вязкости жидкости, являющегося функцией температуры жидкости.

Так как в действительности грунты являются разнозернистыми, то для применения формулы (2-16) необходимо характеризовать грунты некоторым действующим или эффективным диаметром частиц. Очевидно, этот диаметр корреляционно связан со средним размером пор, по которым движется жидкость.

Способы нахождения эффективного диаметра различны у разных авторов. По Хезену — это d_{10}, по Зауербрею он равен d_{17}, по способу Крюгера—Цункера — диаметр частицы, поверхность которой равна средней поверхности частиц, заключающихся в данном объеме грунта и т. д. [88].

Лабораторные способы определения коэффициента фильтрации основаны на фильтрации жидкости (иногда воздуха) через образец грунта, помещенный в специальный прибор. Обычно рабочая часть прибора представляет собой цилиндр, и в нем происходит одномерная фильтрация, а коэффициент фильтрации образца грунта определяется на основании закона Дарси при известном, замеренном расходе [27].

При лабораторном определении коэффициента фильтрации в известных условиях можно наблюдать перемещение внутри грунта мелких частиц под влиянием гидродинамических сил, возникающих при фильтрации. Такое перемещение является причиной выноса частиц из грунта либо накопления мелких частиц в порах грунта в некоторых зонах.

Явление выноса частиц из грунта называют механической суффозией, а явление уплотнения грунта мелкими частицами — кольматацией. Процесс перемещения частиц в грунте иногда сопровождается существенными изменениями во времени коэффициента фильтрации в сторону увеличения или уменьшения.

При наличии в грунте растворимых веществ имеют место диффузия этих веществ в фильтрующей жидкости и перенос диффундирующих частиц потоком. Происходит более или менее быстрый процесс изменения пор грунта или трещин породы, благодаря чему коэффициент фильтрации увеличивается во времени. Такое явление в гидротехнике обычно называется химической суффозией.

Химическая суффозия наблюдается в основаниях некоторых гидротехнических сооружений, и исследование этого процесса тесно связано с исследованием фильтрации как основного фактора интенсификации химической суффозии.

Определение величины коэффициента водоотдачи для некоторых случаев производится согласно имеющимся в литературе рекомендациям, но в сложных случаях этот коэффициент определяется путем лабораторных или натурных исследований.

Так как в лабораторных условиях трудно обеспечить необходимую широту исследований, то в ответственных случаях необходимо прибегать к натурным исследованиям коэффициента водоотдачи.

В лабораторных условиях при определении водоотдающей способности грунта обычно проводится дренирование образца грунта, полностью насыщенного водой и помещенного в вертикальный высокий (до 2,5 м) цилиндрический прибор. При этом во время опыта определяется величина расхода и положение поверхности грунтовой воды в процессе дренирования [111].

§ 2-6. Классификация грунтов по их фильтрационным свойствам

Грунты и трещиноватые породы условно можно подразделить на водопроницаемые и на водоупорные, или водоупоры. Водоупорами называются такие грунты и породы, водопроницаемость которых весьма мала по сравнению с водопроницаемостью соседних пластов. В зависимости от характера фильтрационной задачи, водоупор можно считать водонепроницаемым. Таким образом, водонепроницаемость грунта имеет относительный характер. В одном случае расчета при данном соотношении коэффициентов фильтрации пластов можно считать пласт с меньшим коэффициентом фильтрации водонепроницаемым. В другом случае такое допущение приводит к существенной погрешности.

Водопроницаемые грунты и породы можно подразделить на изотропные и анизотропные. В изотропных средах коэффициент фильтрации в любой точке не зависит от направления скорости фильтрации. Изотропные грунты, в свою очередь, подразделяются на однородные и неоднородные. В однородных грунтах коэффициент фильтрации не зависит от координат области фильтрации. В неоднородных грунтах коэффициент фильтрации зависит от названных координат. В анизотропных средах коэффициент фильтрации в данной точке зависит от направления скорости фильтрации, изменяясь в пределах от $k_{\text{макс}}$ до $k_{\text{мин}}$. Те взаимно перпендикулярные направления, для которых коэффициент фильтрации достигает максимального и минимального значений, а также направление, перпендикулярное им, называются главными направлениями анизотропии.

Примером анизотропных грунтов является грунт, образованный из тонких чередующихся изотропных слоев с двумя различными значениями коэффициента фильтрации, а также лессовый грунт, водопроницаемость которого в вертикальном направлении во много раз больше водопроницаемости в направлении горизонтальном. Анизотропная водопроницаемость может быть обусловлена наличием в породе трещин, ориентированных в определенном направлении.

При наличии анизотропного водопроницаемого грунта закон Дарси выражается в более общей форме, а именно вектор скорости фильтрации

$$\mathbf{v} = K \operatorname{grad} h, \tag{2-17}$$

причем коэффициент фильтрации K является не скаляром, как в изотропном грунте, а тензором [7, 129, 145].

Если в анизотропном грунте значения коэффициента фильтрации в различных точках, но для одного и того же направления являются постоянными, то грунт называется однородно-анизотропным.

В неоднородно-анизотропных грунтах значения коэффициента фильтрации в различных точках, но для одного и того же направления зависят от координат этих точек.

В природе нередко встречаются водопроницаемые пласты, сложенные из отдельных слоев с различными значениями коэффициента фильтрации. Каждый слой может быть образован из неоднородного или изотропного грунта. Такие пласты называются слоистыми.

§ 2-7. Основные уравнения фильтрации

В § 2-1 было определено статистическое понятие скорости фильтрации. Приведем еще несколько определений, связанных с этим понятием и необходимых для дальнейшего изложения. В числе их следует прежде всего упомянуть представления о линиях тока. Линией тока называется такая линия, касательная в каждой точке которой совпадает с направлением скорости фильтрации в этой точке. Поверхность, проведенная в фильтрационном потоке, с которой все линии тока пересекаются ортогонально, называется живым сечением фильтрационного потока.

Область пространства, занятая фильтрационным потоком, называется областью фильтрации. Если скорости фильтрации и пьезометрические давления в точках области фильтрации не изменяются во времени, фильтрация называется установившейся. При изменении во времени указанных характеристик имеет место неустановившаяся фильтрация. Следует отметить, что практически явления неустановившейся фильтрации обусловливают не силы инерции, которые при фильтрации обычно весьма малы, а изменения формы свободной поверхности потока или проявления упругости грунта и жидкости. Если линии тока имеют очень малую кривизну и очень малые углы расхождения, то такая фильтрация, основываясь на известной гидравлической терминологии, называется плавно изменяющейся. В случае нарушения указанных условий соответствующий фильтрационный поток можно назвать резко изменяющимся.

Участки границ фильтрационного потока, на которых давление равно атмосферному, называются свободными поверхностями или поверхностями депрессии. При наличии у потока свободной поверхности фильтрация называется безнапорной, при отсутствии свободной поверхности — напорной. Если в напорном потоке между какими-либо двумя живыми сечениями имеется участок, ограниченный свободной поверхностью, то такая фильтрация называется напорно-безнапорной.

Анализ фильтрационных потоков существенно зависит от общего характера изменения потока в пространстве по отношению к координатным осям. При этом фильтрация называется одномерной в случае, когда все характеристики потока (скорости фильтрации, напоры, давления) являются функцией одной координаты. Если все частицы жидкости перемещаются параллельно некоторой неподвижной плоскости, то фильтрация называется плоской. В случае плоской фильтрации все характеристики потока зависят от двух координат. Большой интерес для практики представляет также плановая фильтрация. Под этим термином понимается фильтрация в горизонтальных или слабо наклонных пластах, когда вертикальные размеры потока весьма малы по сравнению с его горизонтальными размерами. Уравнениями плановой фильтрации можно пользоваться при изучении фильтрации на больших территориях, где горизонтальные размеры потока исчисляются десятками или даже сотнями километров.

Основные расчетные зависимости для перечисленных случаев фильтрации приведены в табл. 2-1. Следует заметить, что для большей общности расчетных данных при расчетах часто используется понятие приведенного напора. Приведенным напор называется при условии, что напор верхнего бьефа $h_1=1$, а напор нижнего бьефа $h_2=0$. Обозначая приведенный напор h_r, имеем следующее выражение действительного напора в любой точке области фильтрации

$$h \quad (h_1 - h_2)\, h_r \quad h_2. \tag{2-18}$$

Линии $h=\text{const}$ называются линиями равных напоров, а $h_r=\text{const}$ — линиями равных приведенных напоров. В случае однородного и изотропного грунта линии тока ортогональны к линиям равных напоров.

Из приведенных в табл. 2-1 формул особого внимания заслуживает уравнение (2-25), в котором учитывается сжимаемость пласта и потока, так называемый упругий режим. В настоящее время имеется большое число работ, посвященных исследованию упругого режима, поскольку результаты расчетов с учетом сжимаемости фильтрационного потока получают подтверждение на практике [107, 117, 158, 193, 194, 197]. Величина a существенно зависит от содержания газа в воде, так как наличие газа изменяет ее сжимаемость.

При интегрировании уравнений типов, указанных в табл. 2-1, необходимо установить граничные условия. При расчетах обычно различают на границах области фильтрации участки четырех видов, а именно:

1) водопроницаемые участки (дно бьефа, затопленные откосы и т. д.), где давление изменяется по гидростатическому закону и где $h=\text{const}$;

Таблица 2-1

Уравнения фильтрации

Тип потока	Уравнения фильтрации
А. Одномерная фильтрация	
Установившееся движение	
Плавно изменяющийся	$Q = -k\omega \frac{dh}{ds} = k\omega I$ (2-19)
Осесимметричный	$Q = -k\omega \frac{dh}{dr}$ (2-20)
Неустановившееся движение	
Плавно изменяющийся	$\frac{\partial}{\partial x}\left(H \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\varepsilon}{k} - \frac{m'}{k} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = 0$ (2-21)
Плавно изменяющийся с горизонтальным водоупором	$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{2\varepsilon}{k} - \frac{2m'}{k} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0$ (2-22)
Б. Плоская фильтрация	
Установившееся движение	
	$v_x = -k \frac{\partial h}{\partial x}$; $v_z = -k \frac{\partial h}{\partial z}$ (2-23)
	$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$ (2-24)
Неустановившееся движение	
Напорный	$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$ (2-25)
	$a = \frac{k(1-\varepsilon')}{\gamma\left(\alpha_v + \frac{\varepsilon'}{E}\right)}$ (2-26)
В. Плановая фильтрация	
Установившееся движение	
	$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0$ (2-27)
Напорный	$\varphi = \int_0^T k(z-h)\,dz$ (2-28)
Безнапорный	$\varphi = \int_0^h k(z-h)\,dz$ (2-29)

Продолжение табл. 2 1

Тип потока	Уравнения фильтрации
Неустановившееся движение	
Безнапорный	$\frac{\partial}{\partial x}\left(H_k \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(H_k \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \varepsilon = m' \frac{\partial H}{\partial t}$ (2-30)

Примечание. В уравнениях (2-19) — (2-30) приняты следующие обозначения: x, y — координаты горизонтальные; s — координата, совпадающая с линией тока; Q — фильтрационный расход; ω — площадь живого сечения; r — радиус-вектор живого (цилиндрического) сечения потока; m' — поверхностный коэффициент водоотдачи (см. § 6-2); H — глубина потока; $h = \frac{p}{\gamma} - z$ — напор; p — давление; γ — вес единицы объема жидкости; z — вертикальная координата; φ — функция Н. К. Гиринского; T — мощность напорного потока; ε — интенсивность инфильтрации; a — коэффициент пьезопроводности; α_v — коэффициент сжимаемости грунта; E — модуль упругости воды; $\varepsilon' = m/(1-m)$ — коэффициент пористости грунта; H_k — водопроводимость пласта; t — время.

2) водонепроницаемые участки (границы подземного контура сооружения, поверхность водоупоров и т. д.), являющиеся линиями тока, где $\psi = \text{const}$;

3) участки высачивания воды, где напор изменяется по линейному закону и где $h = -z$;

4) кривые свободной поверхности, или кривые депрессии, где $h = -z$ и при наличии инфильтрации $\psi + \varepsilon x = \text{const}$ (ψ — функция тока), при $\varepsilon = 0$ значение $\psi = \text{const}$.

Кроме того, на границе двух слоев (1 и 2) с коэффициентами фильтрации k_1 и k_2 для линий тока имеет место условие:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2}, \tag{2-31}$$

где α_1 и α_2 — углы, образуемые касательными к линии тока с нормалью к плоскости контакта. Для линий равных напоров соответственно

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{\operatorname{tg} \beta_1}, \tag{2-32}$$

где β_1 и β_2 — углы, образованные касательными к линиям равных напоров с нормалью к контактной поверхности.

§ 2-8. Краткие сведения о теоретических методах расчета фильтрации

Теоретические методы решения задач по фильтрации весьма разнообразны, и применение их зависит от класса решаемых задач. В настоящее время теория и методика фильтрационных расчетов получили очень большое

развитие. Обзоры работ, посвященных этим вопросам, приводятся во многих монографиях [10, 11, 129, 180].

Обычно методы, основанные на интегрировании дифференциальных уравнений фильтрации при заданных граничных и начальных условиях без всяких дополнительных условий или допущений, называются гидромеханическими «точными» методами. К таким методам относится, например, метод конформных отображений, имеющий целый ряд модификаций [11].

Наряду с точными методами имеются «приближенные» теоретические методы, основанные на некоторых допущениях, вытекающих из опыта. Эти методы позволяют значительно упростить теоретические решения фильтрационных задач и получить достаточно точные для инженерного расчета зависимости. К таким методам относятся, например, метод фрагментов, предложенный Н. Н. Павловским [125], метод суммарного учета местных потерь, предложенный С. Н. Нумеровым [12].

Теоретические методы, основанные на допущении о том, что поверхности равных напоров являются вертикальными плоскостями или цилиндрическими поверхностями с вертикальными образующими, называются часто гидравлическими методами. Они основаны обычно на применении формул (2-19) и (2-20). Некоторые из упомянутых способов расчета, часто применяемые при натурных исследованиях фильтрации, кратко излагаются ниже.

Наконец следует упомянуть об используемом иногда графическом способе построения сеток движения, основанном на известных свойствах линий равных напоров и линий тока [11].

Метод фрагментов

В сложных областях фильтрации часто можно заранее провести линии, близкие к линиям равных напоров или к линиям тока. Эти линии разбивают области фильтрации на отдельные части-фрагменты, формы которых достаточно просты для получения точных или приближенных решений. Эти решения затем связываются между собой определенными зависимостями, в результате чего получается решение для всей области в целом.

Нетрудно видеть, что фрагменты, имеющие в качестве границы линию (поверхность) равных напоров, соединены последовательно; через них протекает один и тот же расход Q. Имея решения задач отдельных фрагментов в виде

$$Q = f_1(H_1), \quad Q = f_2(H_2), \ldots, Q = f_n(H_n),$$

где $H_1, H_2, \ldots, H_n$ — потери напора в каждом из n фрагментов, получаем систему уравнений:

$$f_1(H_1) = f_2(H_2) = \ldots = f_n(H_n). \tag{2-33}$$

Кроме того, сумма потерь напора H известна по заданию, следовательно,

$$H = H_1 + H_2 + \ldots + H_n. \tag{2-34}$$

Из уравнений (2-33) и (2-34) определяются потери напора $H_1, H_2, \ldots, H_n$, а следовательно, и Q.

Если границей между фрагментами является линия тока, то фрагменты имеют параллельное соединение, тогда для n фрагментов будем иметь следующую систему уравнений:

$$Q_1 = f_1(H), \quad Q_2 = f_2(H), \ldots, Q_n = f_n(H), \tag{2-35}$$

причем H — потеря напора, которая будет одной и той же во всех параллельно соединенных фрагментах; $Q_1, Q_2 \ldots, Q_n$ — фильтрационные расходы в каждом фрагменте. Общий расход

$$Q = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n. \tag{2-36}$$

Метод сложения течений

Метод этот основан на том свойстве уравнения Лапласа, по которому сумма частных решений этого уравнения, умноженная на некоторые постоянные, есть также решения уравнения Лапласа. Следовательно, если известны потенциалы двух скоростей течения (в плане), например от двух стоков (скважин), то сумма этих потенциалов определяет потенциал нового течения, образующегося при одновременном действии двух заданных стоков. Другим примером может служить случай действия стока (скважина) на естественный равномерный поток грунтовых вод. Потенциал этого сложного течения будет равен сумме потенциалов равномерного потока и стока [129]. На принципе сложения потенциальных течений основан ряд способов расчета взаимного влияния (интерференции) скважин, образующих группу [1, 179].

Метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений

Ю. П. Борисовым для расчета взаимодействия скважин был предложен метод, основанный на аналогии расчетов фильтрации с расчетом электрических сетей [23]. Как известно, закон Дарси аналогичен закону Ома, причем фильтрационный расход Q является аналогом силы тока, а потери напора — аналогом разности потенциалов. Подобно тому, как электрическое сопротивление определяется отношением разности потенциалов к силе тока, так в теории фильтрации фильтрационное сопротивление равно отношению потери напора (разности пьезометрических уровней) к фильтрационному расходу.

В применении к системам скважин метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений состоит в замене систем скважин эквивалентной системой совершенных траншей. Эти последние системы расположены в плановом отношении так же, как и системы заменяемых ими скважин, имеют ту же величину и распределение дебита и те же поверхности депрессии на некотором относительно малом расстоянии от системы. Общее фильтрационное сопротивление одной скважины определяется формулой:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_k, \tag{2-37}$$

где Φ_0 — внешнее фильтрационное сопротивление при фильтрации к отрезку совершенной траншеи, длина которой равна шагу скважин; это сопротивление определяется плановой формой водоносного пласта и расположением скважин; Φ_k — внутреннее фильтрационное сопротивление в зоне местной резкой деформации потока вблизи скважины.

Внутреннее сопротивление выражается так:

$$\Phi_k = \Phi'_k + \Phi_n + \Delta\Phi_n, \tag{2-38}$$

где Φ'_k — часть сопротивления, отвечающая совершенной скважине; Φ_n — часть сопротивления, учитывающая несовершенство одиночной скважины; $\Delta\Phi_n$ — дополнительное сопротивление, обусловленное несовершенством скважины и ее взаимодействием с другими скважинами [102].

В применении к расчету систем скважин метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений сочетается с методом сложения течений. В литературных источниках [25, 102] приведены зависимости для фильтрационных сопротивлений.

Метод фильтрационных сопротивлений используется при расчетах плановой фильтрации с применением метода ЭГДА и электроинтеграторов.

§ 2-9. Общие сведения о притоке грунтовых вод к одиночным скважинам

Представления о притоке грунтовых вод к скважинам имеют особо важное значение при натурных исследованиях фильтрации, так как на основании уравнений фильтрации к скважинам определяются различные

характеристики пород. Схемы притока грунтовых вод к скважинам разнообразны (см. главу 5). Обычно различают напорные и безнапорные скважины, совершенные и несовершенные (рис. 2-6).

Фильтрация к скважинам относится к случаям осесимметричной фильтрации. Совершенными называются скважины, проходящие через весь водоносный пласт до кровли подстилающего водоупорного слоя. При фильтра-

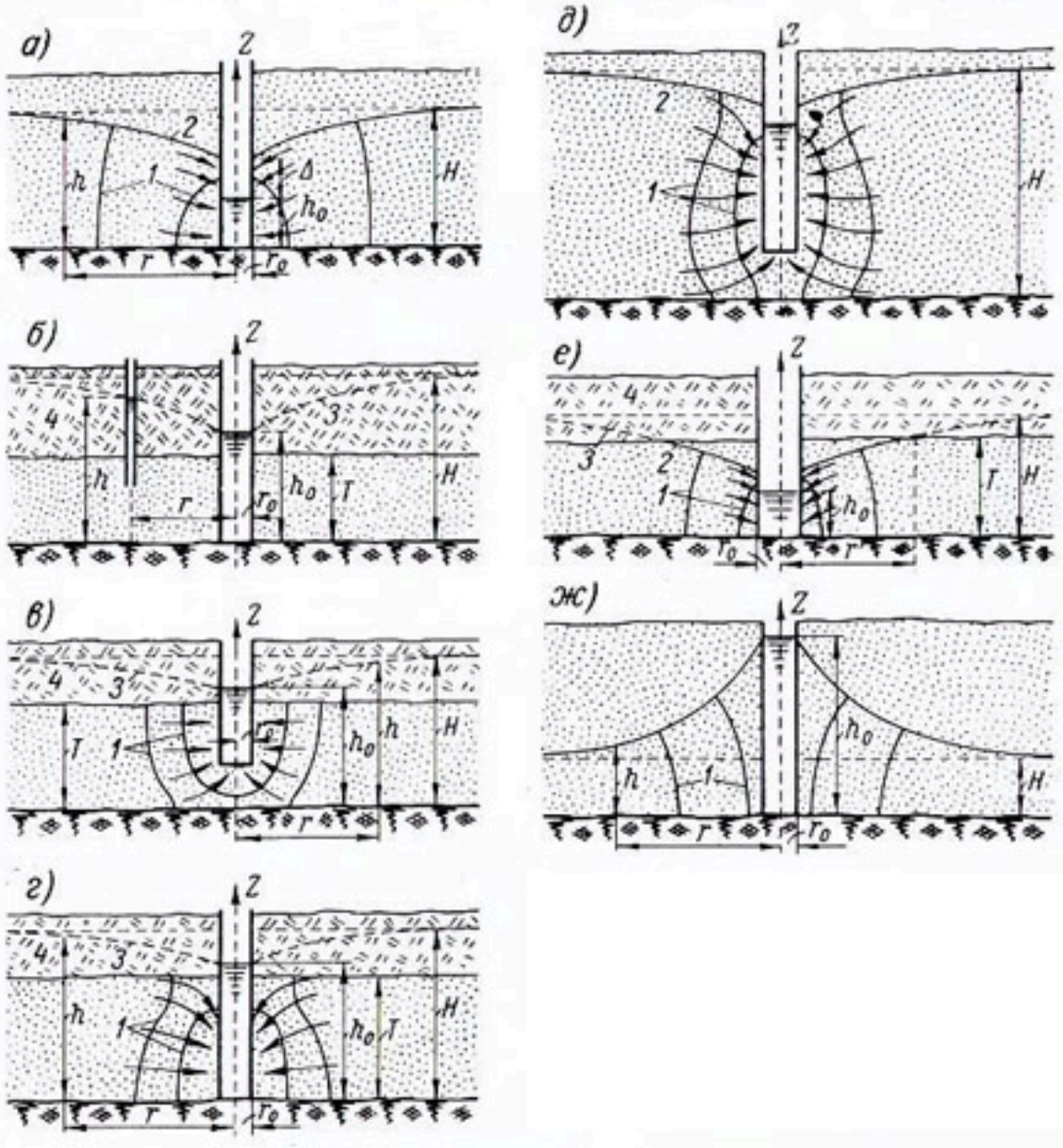


Рис. 2-6. Схемы фильтрации при различных типах скважин: *а* — безнапорная совершенная скважина; *б* — напорная совершенная скважина; *в* — напорная несовершенная по степени вскрытия пласта скважина; *г* — напорная несовершенная по характеру вскрытия пласта скважина; *д* — безнапорная несовершенная по степени и характеру вскрытия пласта скважина; *е* — напорно-безнапорная совершенная скважина; *ж* — безнапорная совершенная поглощающая скважина.

1 — линии равных напоров; *2* — кривая депрессии; *3* — пьезометрическая кривая; *4* — слабопроницаемые породы.

ции к безнапорной совершенной скважине грунтовый поток имеет свободную поверхность воронкообразной формы. Свободная поверхность потока пересекается со стенками скважины выше уровня воды в ней, образуя поверхность высачивания высотой Δ. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, высота Δ зависит от глубины непониженного потока H, глубины воды в скважине h_0 и радиуса скважины r_0 [211], однако

практически при больших значениях H/r_0 высота Λ зависит лишь от отношения h_0/H [8] и при малых h_0 достигает весьма значительных величин порядка $0{,}8H$. Вследствие этого линии равных напоров поблизости от скважины резко искривляются, и лишь на расстоянии $r=(1{,}5 \div 2)H$ от оси скважины они становятся близкими к вертикальным прямым. Далее осесимметричный поток приближается к цилиндрическому, причем величина напора $h=f(r)$ и равна глубине грунтового потока. Близ скважины $h=f(r, z)$, где z — вертикальная координата.

В общем виде расчетную зависимость для дебита любой скважины можно представить в виде

$$Q = \frac{\alpha \pi k T S}{\Phi}, \qquad (2\text{-}39)$$

где $S=\Lambda H$ — перепад напора, обеспечивающий фильтрацию с расходом Q к скважине; Φ — фильтрационное сопротивление, величина которого определяется типом скважины и условиями притока к скважине; T — мощность водоносного пласта; α — некоторый безразмерный коэффициент, зависящий от типа фильтрационного потока.

Остановимся на притоке грунтовых вод к несовершенным скважинам. Различают два вида несовершенных скважин: по степени вскрытия и по характеру вскрытия.

При первом виде несовершенства скважина вскрывает водоносный пласт не на всю мощность, а лишь частично. Такой случай иллюстрируется рис. 2-6, *в*, на котором изображена схема напорной несовершенной скважины. Осесимметричный фильтрационный поток вблизи скважины резко изменяется. Но на некотором расстоянии от скважины, равном приблизительно $(1{,}5 \div 2)T$, практически имеет место цилиндрическая фильтрация и поверхности равных напоров близки к цилиндрическим поверхностям с вертикальной образующей.

Несовершенными скважинами по характеру вскрытия пласта называются скважины, у которых не вся поверхность забоя является фильтрующей поверхностью, т. е. либо водоприемная часть скважины не доходит до верхнего водоупорного слоя (рис. 2-6, *г*), либо жидкость поступает в скважину через отверстия с различным размещением и различной формой.

При несовершенстве по характеру вскрытия пласта фильтрация становится цилиндрической только на некотором расстоянии от скважины, а около скважины линии равных напоров резко искривляются.

Возможно несовершенство обоих видов (рис. 2-6, *д*), когда безнапорная скважина вскрывает водоносный пласт не на всю мощность, и в то же время ее водоприемная часть не доходит до естественного уровня грунтовых вод.

При соответствующем понижении уровня воды в скважине, заложенной в напорном пласте на некотором расстоянии r от оси скважины, поток из напорного становится безнапорным (рис. 2-6, *е*). Пьезометрическая кривая при напоре $h \leqslant T$ переходит в кривую депрессии. При наливе воды в скважину любого типа она становится поглощающей (рис. 2-6, *ж*).

Формулы для определения фильтрационного расхода из поглощающих скважин имеют тот же вид, что и для скважин водосборных, но знаки величин h_0 и h меняются на обратные. Методика расчета одиночных несовершенных скважин разрабатывалась рядом авторов и изложена во многих статьях и монографиях [1, 25, 44, 179, 219].

§ 2-10. Определение характеристик грунтовых потоков по натурным данным

Остановимся на вычислении некоторых характеристик грунтовых потоков: скоростей, давлений, расходов по данным натурных наблюдений. При этом будем иметь в виду лишь гидравлическую сторону вопросов, не касаясь задач натурных исследований различных объектов.

При определении скоростей фильтрации в живых сечениях безнапорных грунтовых потоков необходимо знать градиенты напора и коэффициенты фильтрации. Градиент напора определяется для некоторого участка потока. Если длина участка Δs, а разность отметок уровней грунтовых вод Δh, то средний градиент напора на участке

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta s}. \tag{2-40}$$

Следовательно, скорость фильтрации в данном живом сечении при коэффициенте фильтрации k равна

$$v = k\frac{\Delta h}{\Delta s}. \tag{2-41}$$

Если пласт образован из нескольких слоев с различными коэффициентами фильтрации, то последняя формула применяется к каждому слою.

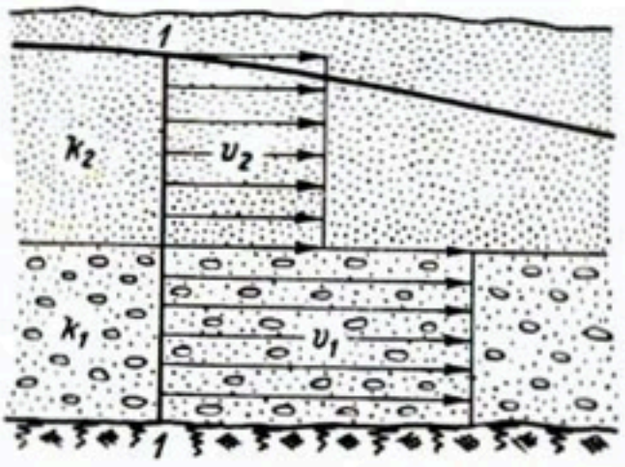


Рис. 2-7. Эпюра скоростей фильтрации в слоистом пласте.

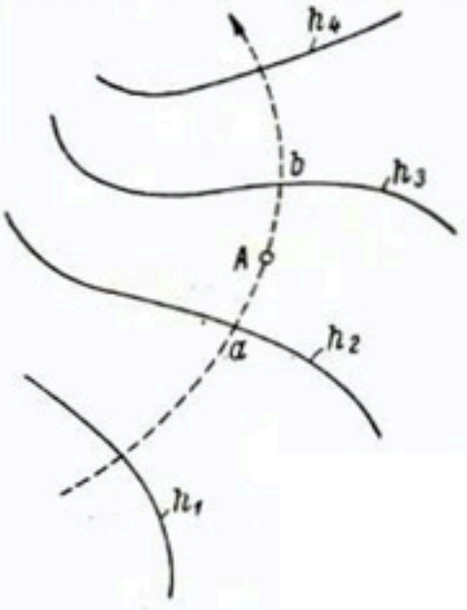


Рис. 2-8. Схема плановой фильтрации.

Эпюра скоростей фильтрации в данном сечении *1—1* представляется в виде ступенчатой линии, как показано на рис. 2-7, где пласт состоит из двух слоев с коэффициентами фильтрации k_1 и k_2, причем $k_1 > k_2$. Для плановой фильтрации условие плавной изменяемости, вообще говоря, выдерживается только на вертикалях, и поэтому скорость фильтрации определяется на данной вертикали. Положим, что требуется определить скорость на вертикали в точке A плана гидроизогипс, показанного на рис. 2-8. Проведем через точку A линию тока. Среднее значение градиента напора на отрезке ab линии тока будет

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta s} = \frac{h_2 - h_3}{\Delta s}, \tag{2-42}$$

где $h_2 - h_3$ — разность уровней грунтовой воды на отрезке ab линии тока; Δs — длина отрезка. Скорость фильтрации на вертикали A определится по формуле (2-41).

При наличии данных о скорости фильтрации в живом сечении потока фильтрационный расход в этом сечении

$$Q = \omega v. \tag{2-43}$$

Если в пределах данного сечения скорость фильтрации изменяется, то, разбивая сечение на n частей и считая в пределах каждой части скорость фильтрации постоянной, будем иметь формулу для определения расхода:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \omega_i v_i, \qquad (2\text{-}44)$$

где ω_i — площади отдельных частей живого сечения; v_i — соответствующие скорости фильтрации.

Живые сечения в плавно изменяющемся потоке при плановой фильтрации представляют собой цилиндрические поверхности с вертикальными образующими и направляющими, которые являются гидроизогипсами или гидроизопьезами. Так как вдоль направляющих градиенты напора изменяются, то при вычислении Q живые сечения вертикальными линиями разбиваются на части, в пределах которых можно считать $v_i = \text{const}$.

Давления и напоры в точках области фильтрации измеряются с помощью точечных пьезометров. На рис. 2-9 показана схема такого измерения. В пьезометре, заложенном в точке A, высота h уровня воды над горизонтальной плоскостью сравнения $0-0$ является пьезометрическим напором в данной точке. Давление в этой точке выражается пьезометрической высотой

$$\frac{p}{\gamma} = h - y, \qquad (2\text{-}45)$$

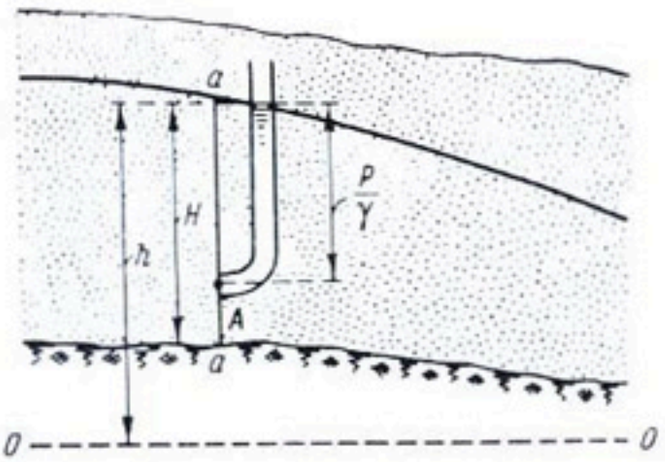


Рис. 2-9. Схема плавно изменяющейся фильтрации.

где y — вертикальная координата точки, отсчитываемая от плоскости сравнения $0-0$.

На основании показаний пьезометров строятся линии равных напоров $h = \text{const}$, а также эпюры напоров и давлений на линиях подземного контура гидротехнических сооружений, о чем говорится в следующем параграфе.

В условиях плавно изменяющейся, например одномерной или плановой, фильтрации напоры h будут постоянными в пределах вертикальных плоских или цилиндрических живых сечений. Пьезометрическое давление изменяется в пределах живых сечений по гидростатическому закону, как показано на рис. 2-9, где напор h в сечении $a-a$ отсчитывается от плоскости сравнения.

§ 2-11. Эпюры напоров и давлений на флютбеты гидросооружений

Флютбеты гидротехнических сооружений обычно имеют сложную форму, а основания их образованы из слоев пород с различными значениями коэффициента фильтрации. В этих условиях существующие теоретические расчеты дают лишь грубо ориентировочные значения напоров в областях фильтрации под флютбетами, и почти во всех случаях проектирования флютбетов приходится обращаться к методу ЭГДА.

В эксплуатируемых гидросооружениях давления и напоры, определяемые на основании показаний пьезометров, являются важнейшими материалами для анализа работы сооружений.

В § 2-7 были приведены основные понятия, связанные с напорной фильтрацией под гидросооружениями. Теперь мы остановимся на построении эпюр напоров и давлений, характеризующих фильтрацию названного вида, имея в виду данные, полученные из натурных наблюдений.

Обычно число пьезометров пьезометрической сети таково, что по их показаниям нельзя построить линии равных напоров во всей области фильтрации, а можно лишь получить величины напоров на подземном контуре сооружения в некоторых характерных точках, например в зоне действия разгрузочных скважин, в напорных пластах, залегающих в основании сооружения, и т. д.

Для проверки статической устойчивости плотины или другого гидросооружения (судоходного шлюза, гидростанции и т. д.) необходимо знать давления, действующие по подземному контуру сооружения. С этой целью на основании показаний пьезометров строятся эпюры давлений. На рис. 2-10 изображен поперечный разрез бетонной водосливной плотины. Точки перелома подземного контура обозначены цифрами 1, 2, ..., 9. Для построения эпюры напоров необходимо выбрать плоскость сравнения. Такой плоскостью

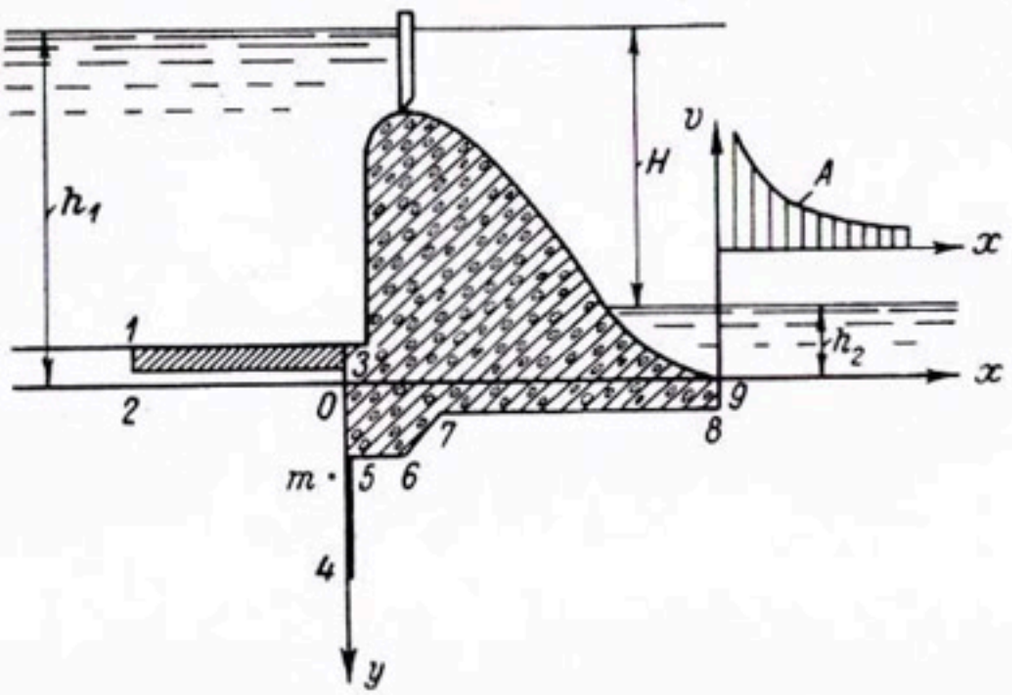


Рис. 2-10. Схема подземного контура плотины.
A — эпюра выходных скоростей фильтрации.

сравнения на рис. 2-10 является горизонтальная плоскость, совпадающая с плоскостью дна нижнего бьефа. Эпюра напоров показана на рис. 2-11. Она представляет собой кривую, построенную на линии развернутого контура флютбета, изображенного на рис. 2-10. От линии развернутого контура отложены вертикально вверх отметки показаний пьезометров, установленных по подземному контуру сооружения, в результате чего получилась кривая *AB*. Далее, от горизонтальной линии развернутого контура откладываются вертикальные координаты y соответствующих точек контура флютбета (нижняя ломаная линия на рис. 2-11, *б*). В результате получается эпюра давлений, выраженных высотой водяного столба. Расстояния по вертикали, измеренные между линией напоров *AB* и ломаной линией заглублений, равны пьезометрическим высотам в соответствующих точках. Так, для точки m, лежащей на линии шпунта (рис. 2-10), пьезометрическая высота (рис. 2-11, *б*).

$$\frac{p}{\gamma} = h + y.$$

На основании имеющейся эпюры давления можно построить эпюру приведенных напоров, определяя по формуле (2-18) для ряда точек линии развернутого подземного контура величины приведенных напоров:

$$h_r = \frac{h - h_2}{h_1 - h_2}.$$

Эпюра приведенных напоров для данного контура инвариантна по отношению к изменению напоров верхнего и нижнего бьефов. Это свойство эпюры приведенных напоров можно использовать при исследовании суффозии и кольматации грунта основания, так как деформация этой эпюры возникает при изменении закономерности распределения величин коэффициента фильтрации в данной области.

Эпюра приведенных напоров может изменяться также за счет влияния упругости пласта, при упругом режиме фильтрации, однако эти изменения имеют временный характер.

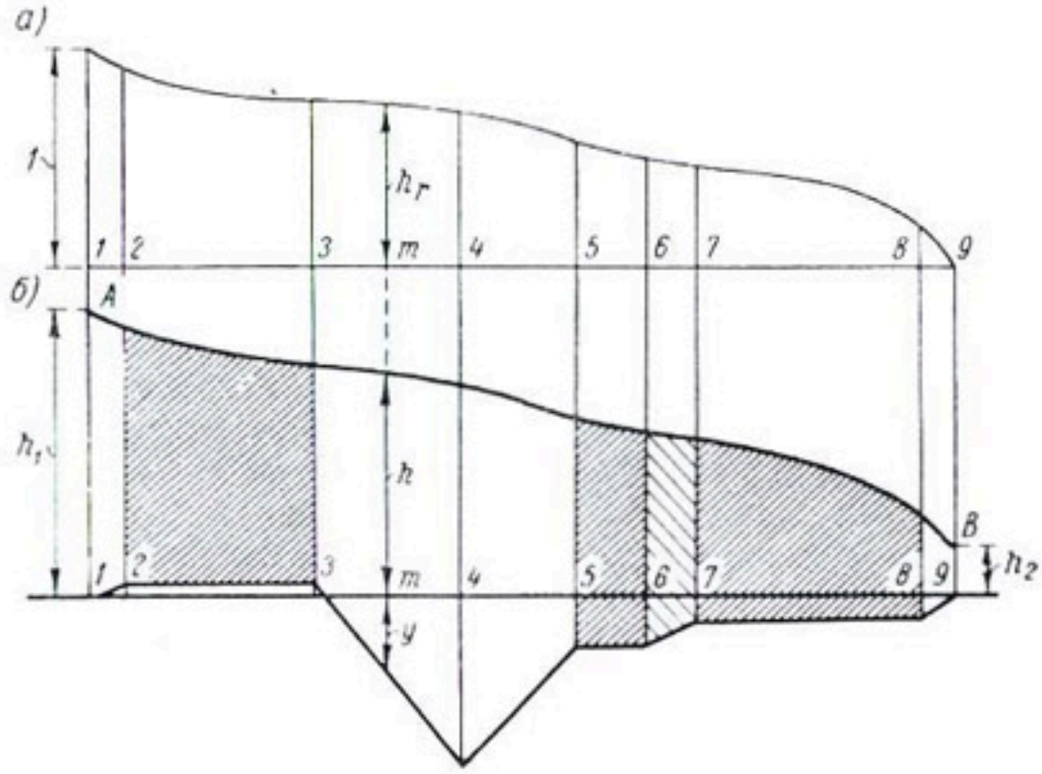


Рис. 2-11. Эпюры: *а* — приведенных напоров h_r; *б* — давлений $\frac{p}{\gamma} = h + y$ на флютбет.

Противодавлением на сооружение называется вертикальная составляющая суммарной силы давления на элементы подземного контура. Эпюра, выражающая противодавление, получается из эпюры давления, если из нее выбросить те участки, на которых давление направлено по горизонтали. На рис. 2-11, *б* заштрихованные части эпюры давления составляют эпюру противодавления. Следует иметь в виду, что на наклонных частях контура (*6—7* на рис. 2-10) действует противодавление, равное лишь вертикальной составляющей силы суммарного давления, выражаемой площадью эпюры давления. Эта составляющая равна силе давления, умноженной на косинус угла наклона к горизонту соответствующей части подземного контура. На рис. 2-11, *б* часть эпюры давления, приходящегося на наклонную площадку, выделена разреженной штриховкой.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ ГРУНТОВЫХ ПОТОКОВ В НАТУРЕ

§ 3-1. Основные цели определения форм грунтовых потоков

Определение форм грунтовых потоков является важнейшей частью изучения режима грунтовых вод, понимаемого в широком смысле этого термина.

Имея форму грунтового потока, определяемую его границами, граничными условиями и поверхностями равных напоров, а также зная коэффициенты фильтрации, можно оценить все его гидродинамические характеристики: скорости фильтрации в любой точке, фильтрационные расходы в любом сечении потока, гидродинамические давления.

Форма грунтового потока обусловлена целым рядом естественных и искусственных факторов: гидрологических, геологических, водохозяйственных и других, изменяющихся во времени.

При проектировании гидротехнических сооружений для рационального размещения и выбора конструкции этих сооружений необходимо иметь достаточно ясное представление о форме грунтового потока в районе сооружений. При этом следует знать условия питания грунтовых вод, а также располагать данными о сезонных, годовых и многолетних изменениях уровней, дебитов, температур и химического состава грунтовых потоков.

После возведения гидротехнических сооружений режим грунтовых вод резко изменяется. Так, в районах водохранилищ подпор грунтовых вод распространяется на значительную площадь, измеряемую в сотнях и даже тысячах квадратных километров. Происшедшие изменения режима грунтовых вод особенно сильно сказываются на форме грунтового потока и направлении фильтрации вблизи подпорных или дренажных сооружений. Точно так же изменяется режим грунтовых вод при работе оросительных систем, горных выработок и т. д.

Имея полные данные о естественном режиме грунтовых вод, возможно дать с известной степенью точности прогноз изменения режима грунтовых вод в связи с возведением гидросооружений. Этот прогноз основывается на соответствующих филь-

трационных расчетах, выполняемых теоретически, при помощи метода ЭГДА или же при помощи аналоговых счетных машин (электро- и гидроинтеграторов). За последнее время в сложных случаях расчета применяются электронные цифровые вычислительные машины.

Определение форм и направлений грунтовых потоков в процессе эксплуатации сооружений является также существенно необходимым.

Определение формы грунтового потока и давления в соответствующих точках обычно проводится по результатам систематических наблюдений за уровнями воды в пьезометрах. На основании указанных данных решаются самые разнообразные вопросы, связанные с воздействием грунтового потока на сооружения, такие, например, как устойчивость сооружений, обнаруживание строительных дефектов, определение фильтрационных расходов, коэффициентов фильтрации грунта и т. д.

Во многих случаях анализ формы грунтового потока приводит также к мероприятиям, предотвращающим аварии сооружений. В настоящее время нет почти ни одного гидроузла, не оборудованного пьезометрической сетью, дающей возможность исследовать изменение форм грунтовых потоков во времени как в пределах сооружений, так и на окружающих их территориях.

Изучение грунтовых потоков имеет свои специфические особенности в связи с типом сооружений, нарушающих естественный режим грунтовых вод. Так, можно указать на изучение форм грунтовых потоков в связи с использованием подземных вод для водоснабжения, изучение форм грунтовых потоков в районах орошения, горных разработок и гидротехнических узлов [101]. Во всех этих случаях изучение режима грунтовых вод, а следовательно, и изучение форм грунтовых потоков, построенное на единой теоретической основе, имеет различное назначение в зависимости от поставленных частных задач: добыча воды, защита от подтопления, борьба с суффозией грунтов и т. д. Это следует учитывать при проектировании пьезометрических сетей и при определении объема и частоты наблюдений за фильтрационными процессами.

§ 3-2. Основные сведения о проектировании пьезометрических сетей

Успешность осуществления наблюдений за режимом грунтовых вод в значительной степени зависит от рациональности размещения пьезометров по контролируемой территории. В настоящее время накоплен большой опыт организации и проведения подобных наблюдений и выработаны определенные правила проектирования пьезометрической сети. Такие правила имеют известную дифференциацию в зависимости от объекта наблюдений. При этом прежде всего следует различать размещение

пьезометрических сетей на больших территориях для региональных наблюдений и на территории самих сооружений.

Сеть наблюдательных точек при региональном изучении режима грунтовых вод создается для установления общих закономерностей в многолетнем разрезе. Проектирование такой сети на огромной территории СССР является специальным вопросом, решаемым на основании типизации режимов подземных вод, установления региональных закономерностей режима подземных вод и режимообразующих факторов [80].

Для определения пьезометрических напоров в натурных условиях в районе гидротехнических сооружений и на прилегающих к ним территориях применяются пьезометры различной конструкции. Способы установки пьезометров и их конструкция описаны в [42, 43, 147, 156, 198].

Пьезометры для измерения напоров плавно изменяющихся грунтовых потоков, в которых поверхности равных напоров близки к цилиндрическим поверхностям (§ 2-8), имеют достаточно длинную рабочую часть, обычно равную мощности водоносных слоев, в которых измеряется напор. При измерении напора в резко изменяющихся грунтовых потоках, например в основаниях гидротехнических сооружений, употребляются точечные пьезометры. Они измеряют напор в ограниченной зоне, и их рабочая часть, имеющая отверстия для пропуска воды, имеет небольшую длину (около 250 *мм*).

Понятно, что при резко изменяющейся фильтрации, при которой линии равных напоров сильно искривлены, применение пьезометров с длинной рабочей частью дает некоторые «средние» значения напоров, искажающие представление о форме потока. Неучет этого обстоятельства имеет место как в натурных, так и в лабораторных исследованиях.

Пьезометры, служащие для определения напоров в различных точках и сечениях грунтовых потоков, в основном предназначены для того, чтобы определить форму грунтового потока. Однако те же пьезометры иногда можно использовать с целью определения коэффициентов фильтрации пород путем откачек или нагнетания в них воды или определения скоростей в порах грунта путем запуска индикаторов, о чем будет сказано в главе 5. Пьезометры используются также для измерения температуры грунтовой воды, для взятия проб грунтовой воды с целью определения ее химического состава.

Весьма важно иметь в виду, что для рационального размещения пьезометрических сетей необходимо располагать предварительными сведениями о форме и режиме исследуемого грунтового потока. Стационарная сеть пьезометров для исследования естественных грунтовых потоков проектируется главным образом на основании данных разведочных исследований топографических, геологических и гидрогеологических условий. При постройке гидросооружений пьезометрическая сеть, помимо ука-

занных данных, проектируется на основании прогноза режима грунтовых вод данного района, определяемого путем специальных расчетов. Такие расчеты обычно проводятся с учетом экстремальных значений уровней верхнего и нижнего бьефов. Соответствующее исследование рационально провести по методу ЭГДА. Опыт проектирования пьезометрических сетей, имеющийся во ВНИИГ, показывает, что метод ЭГДА существенно помогает при проектировании таких сетей в земляных и бетонных плотинах, а также на территориях, подверженных действию подпора грунтовых вод от гидротехнических сооружений.

Размещение пьезометрических скважин обосновывается геологическим строением и гидрогеологическими условиями изу-

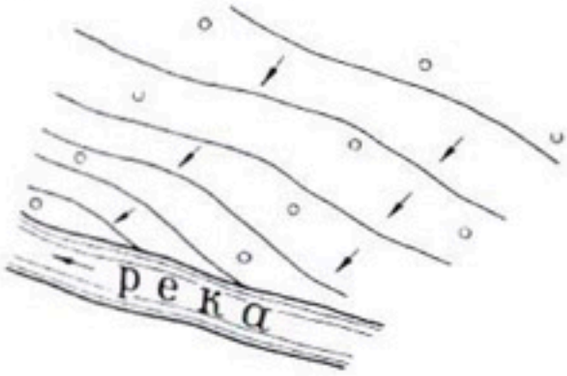


Рис. 3-1. План гидроизогипс и пьезометрическая сеть.
о — пьезометры.

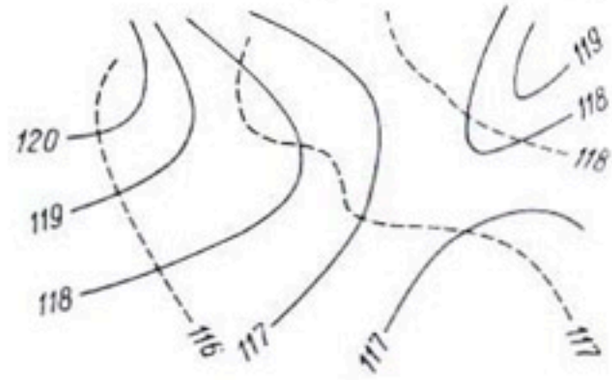


Рис. 3-2. Карта гидроизогипс (сплошные линии) и гидроизопьез (пунктирные линии).

чаемого района, с учетом также и искусственных факторов, как-то: повышения уровня грунтовых вод вследствие поднятия горизонта водохранилища, работы дренажной сети, орошения и т. д. Если скважины размещаются в искусственных сооружениях, то их размещение определяется конструкцией сооружений и проектным водным режимом сооружений.

При исследовании форм естественных грунтовых потоков размещение пьезометрических скважин обычно производится приблизительно по направлению течения грунтовых вод (рис. 3-1). Это направление при наличии реки определяется линиями, нормальными к урезу воды в реке. В пределах данного профиля, определяемого направлением грунтового потока, скважины обычно располагаются на расстоянии 100—200 *м* друг от друга, а при небольших пьезометрических уклонах и обширной территории это расстояние может быть взято значительно большим. Расстояние между скважинами должно уменьшаться при увеличении пьезометрического уклона, что имеет место вблизи берега реки или же в той зоне области фильтрации, где коэффициент фильтрации уменьшается.

Расстояние между отдельными профилями устанавливается в зависимости от рельефа местности, формы водотоков и формы поверхности депрессии.

Сеть должна быть такой, чтобы по замеренным уровням воды в скважинах можно было просто и однозначно построить карты гидроизогипс, т. е. линий $h = \text{const}$.

Кроме верхнего водоносного горизонта, представляют интерес нижележащие водоносные горизонты, их связь с верхним горизонтом. Для этой цели пьезометрические скважины устанавливаются не только в верхнем, но и в нижних, обычно напорных водоносных горизонтах. Пьезометрическая сеть нижних напорных горизонтов дает возможность на основании показаний пьезометров построить карты гидроизопьез (линий $h = \text{const}$) для этих горизонтов. Посредством анализа карт гидроизопьез для нижнего и гидроизогипс для верхнего горизонтов устанавливается связь между этими горизонтами, а также связь с от-

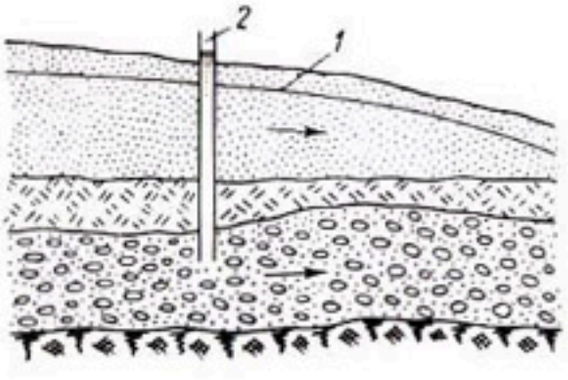


Рис. 3-3. Схема фильтрации в напорном и безнапорном пластах.
1 — кривая депрессии; *2* — пьезометр в напорном пласте.

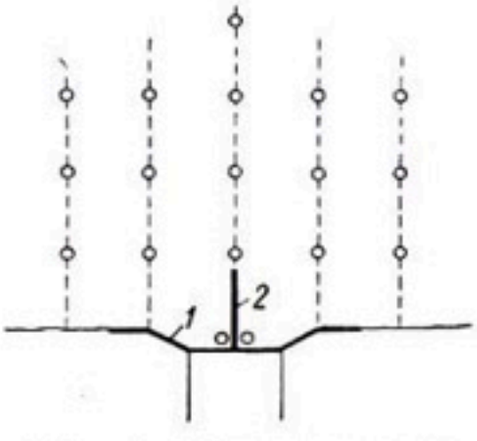


Рис. 3-4. План размещения пьезометров в береговом примыкании гидросооружения.
1 — устой; *2* — береговая шпора.

крытыми водотоками. Вследствие различных граничных условий для безнапорного и напорных водоносных горизонтов полученные для них карты гидроизогипс и гидроизопьез могут резко отличаться по форме изолиний и по общим направлениям фильтрации. Поэтому целесообразно закладывать скважины в напорном горизонте на небольшом расстоянии от скважин безнапорного горизонта. На рис. 3-2 в качестве примера показаны карты (план) гидроизогипс и гидроизопьез для верхнего и нижнего горизонтов и на рис. 3-3 профиль этих горизонтов.

Подпор грунтовых вод от плотин распространяется часто на весьма обширную территорию. Поэтому расстояния между пьезометрическими скважинами могут быть весьма значительными. Близ береговых примыканий расстояния между скважинами уменьшаются. Основной створ проходит по оси плотины, а параллельно ему располагаются другие створы (рис. 3-4), назначением которых является наблюдение за фильтрацией в береговом примыкании. По обеим сторонам береговой шпоры поставлены пьезометры. Разумеется, в зависимости от конструкции берегового устоя, наличия противофильтрационных

устройств, а также изменения коэффициента фильтрации по площади, сеть скважин может иметь различные формы. На рис. 3-5 изображено правобережное примыкание бетонной плотины Чиф Джозеф в США высотой 60,9 *м* и показаны сеть пьезометров и гидроизогипсы грунтового потока. Характерными чертами дан-

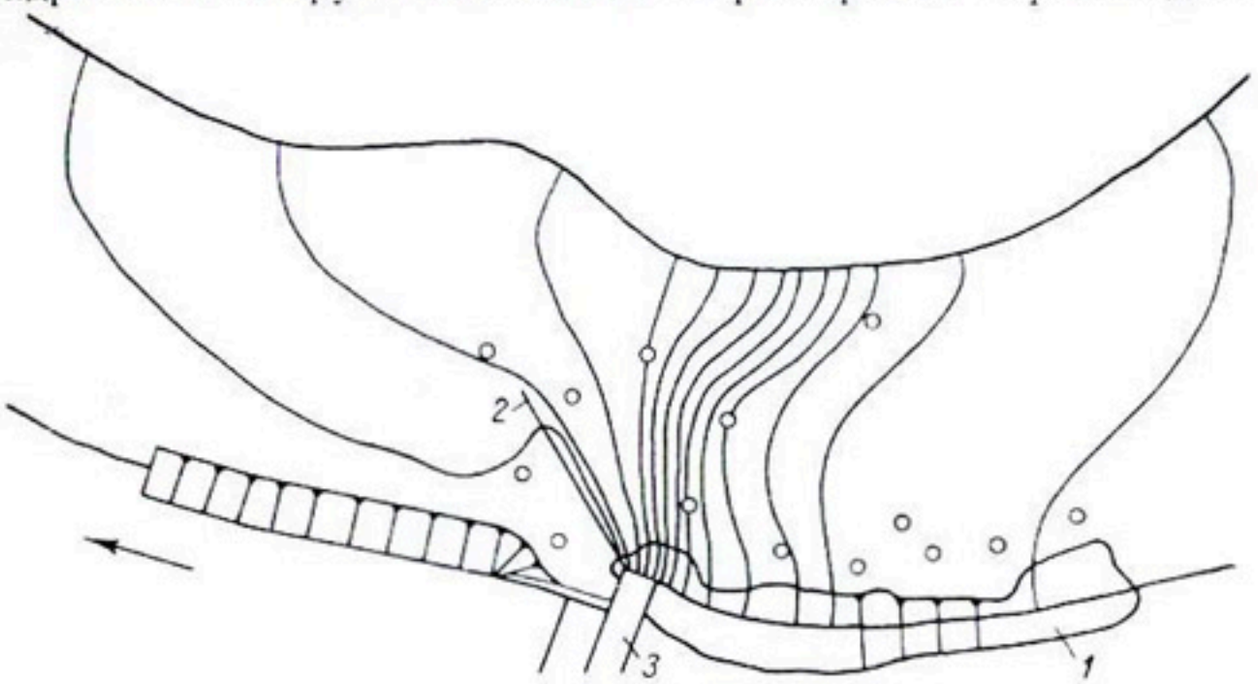


Рис. 3-5. Береговое примыкание плотины Чиф Джозеф (США).
1 — береговой экран; *2* — дренажный туннель; *3* — плотина; ○ — пьезометры.

ного берегового примыкания является наличие берегового экрана длиной около 600 *м* в верхнем бьефе и дренажного туннеля. В средней части карты имеется сгущение гидроизогипс, обусловленное наличием слабопроницаемого грунта, образующего барьер. Поверхность депрессии пересекается с поверхностью слабопроницаемой коренной породы. Таким образом, подпор грунтовых вод распространяется лишь на нижней береговой террасе.

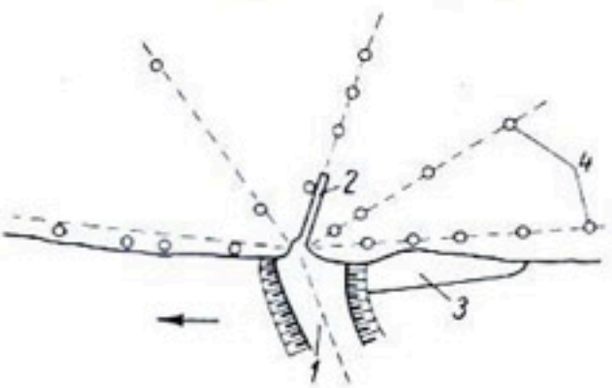


Рис. 3-6. Схема лучевого расположения пьезометров в береговом примыкании.
1 — плотина; *2* — завеса; *3* — береговой экран; *4* — пьезометры.

Часто представляется целесообразным располагать пьезометры в береговых примыканиях на лучах, выходящих из точки пересечения оси плотины с берегом (рис. 3-6). Такое расположение пьезометров принято, например, в правобережном примыкании Каховской плотины.

При проектировании пьезометрической сети следует иметь в виду, что подпор грунтовых вод от плотины распространяется при наличии водопроницаемых грунтов приблизительно до той

гидроизогипсы естественного грунтового потока, отметка которой равна отметке подпертого бьефа. Если береговое примыкание осуществляется в аллювиальной террасе, примыкающей к слабопроницаемым породам, то подпор распространяется до конца террасы, как это показано на рис. 3-7.

Для наблюдения за фильтрацией в земляных плотинах устраиваются пьезометрические скважины в створах, перпендикулярных оси плотины. Здесь следует отметить, что в некоторых случаях пьезометрические створы следует закладывать у берего-

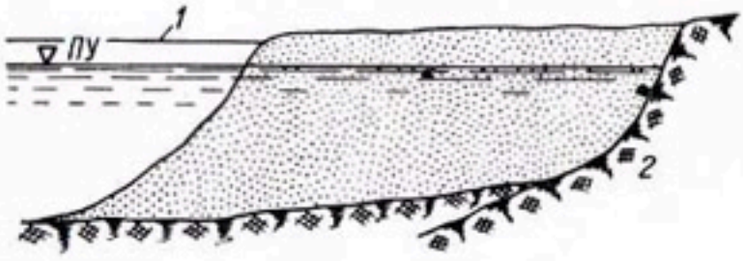


Рис. 3-7. Распространение подпора в аллювиальной террасе.
1 — гребень плотины; *2* — коренная порода.

вых концов земляных плотин, имеющих экраны, так как вследствие фильтрации в берегах фильтрация в теле плотины имеет пространственный характер (см. § 9-5).

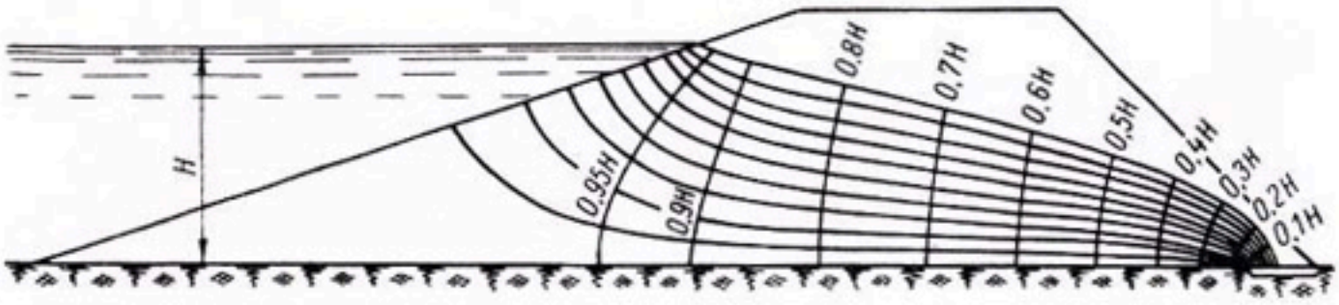


Рис. 3-8. Сетка фильтрации в теле земляной плотины.

Линии равных напоров в теле земляной плотины близ верхового и низового откосов значительно искривлены (рис. 3-8). Вследствие этого пьезометры, имеющие назначение фиксировать точки кривой депрессии, должны не очень сильно заглубляться в тело плотины.

Для установления глубины пьезометрических скважин и оптимального количества их необходимо предварительно построить тем или иным путем кривые депрессии в плотине при максимальных и минимальных отметках уровней бьефов. В средней части кривая депрессии в земляной плотине является достаточно плавной и пологой, причем для плотин, основанных на водоупоре, она близка к параболе.

Первый пьезометр, исходя из форм кривых депрессии, следует ставить недалеко от уреза воды в верхнем бьефе. В средней

части можно поставить 2—3 пьезометра и один или два пьезометра в нижней части кривой депрессии. Последний пьезометр целесообразно поставить вблизи обратного фильтра дренажа. При помощи этого пьезометра можно контролировать работу обратного фильтра.

Количество пьезометрических створов зависит от длины плотины, а также от изменения по длине профилей и геологического строения основания. При слоистом основании плотины

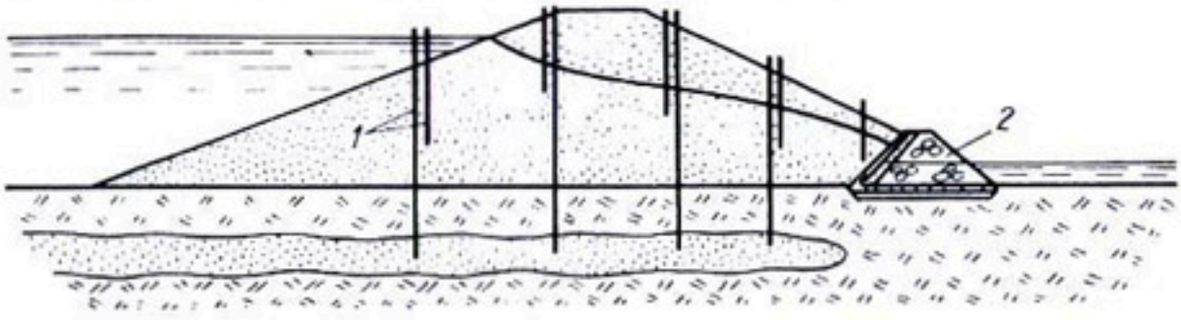


Рис. 3-9. Пьезометрический створ в земляной плотине.
1 — пьезометры; *2* — банкет.

целесообразно ставить пьезометры с фильтрами как в верхнем, так и в нижних сильно водопроницаемых пластах в основании плотины (рис. 3-9). В особенности важно иметь сведения о на-

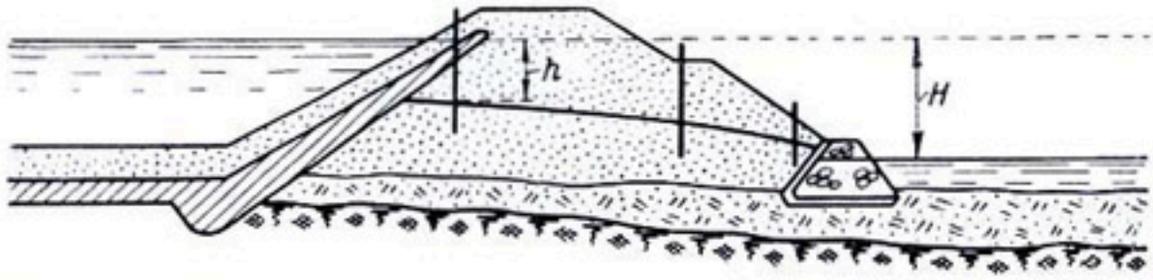


Рис. 3-10. Пьезометрический створ в земляной плотине с экраном.

порах в сильно водопроницаемых пластах в нижнем бьефе, где возможен выпор грунта верхнего слабопроницаемого слоя.

При наличии у земляной плотины экрана кривая депрессии за экраном резко понижается. Разность уровней h воды в водохранилище и в начальной части кривой депрессии за экраном, отнесенная к общему напору H, позволяет судить об эффективности экрана (рис. 3-10).

В плотинах, имеющих ядро, часть пьезометров размещается в ядре, а один пьезометр ставится выше ядра. Ниже ядра целесообразно поставить не менее двух пьезометров (рис. 3-11), один из которых помещается перед дренажным устройством. В случае набросных плотин с ядром пьезометры в низовой призме не ставятся, так как кривая депрессии имеет весьма пологое очертание, и ее падение по длине потока незначительно.

Пьезометрические створы в напорных гидросооружениях, а именно в бетонных плотинах и гидростанциях, назначаются

в первую очередь исходя из соображений получения эпюр напоров на подземные контуры сооружений во всех характерных сечениях. Эти сечения определяются как геологией основания сооружения, так и особенностями его конструкции. В ответственных сооружениях створы располагают в каждом пролете. На рис. 3-12 показана часть схематического плана гидроузла с указанием местоположения пьезометров по створам бетонной плотины и здания ГЭС [74].

По створу пьезометры ставятся в местах резких переломов подземного контура сооружений: по обеим сторонам шпунтовых стенок, завес, зубьев. Весьма важно иметь натурные данные о работе противофильтрационных и дренажных устройств: понуров, зубьев, обратных фильтров дренажей. Пьезометриче-

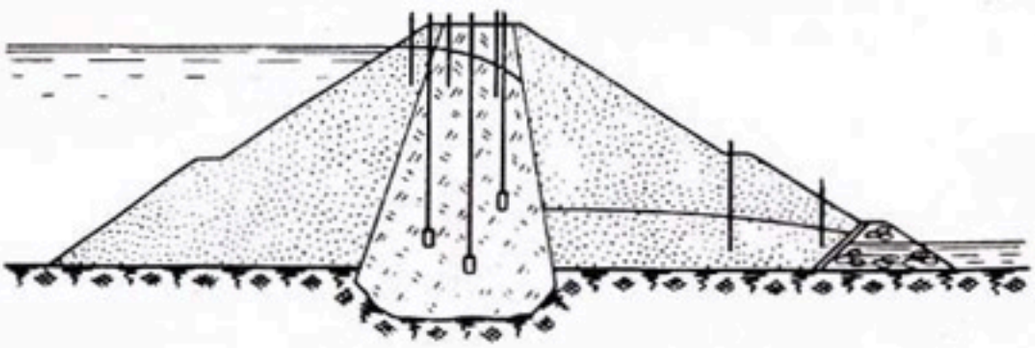


Рис. 3-11. Пьезометрический створ в земляной плотине с глинистым ядром.

ская сеть проектируется с целью оценки эффективности таких устройств во всех смежных горизонтах.

В местах сопряжений напорных сооружений с берегами и с земляными плотинами эпюры пьезометрических напоров значительно отличаются от тех же эпюр в средних сечениях сооружений. На этих участках происходит пространственная фильтрация и сказывается влияние раскрытия швов и образования трещин. Поэтому в указанных местах сопряжений также желательно иметь пьезометрические створы. При наличии нескольких водоносных горизонтов должна быть предусмотрена возможность контроля фильтрации в них с помощью этих створов.

Опыт показывает, что перечисленные выше требования не всегда выполняются. При анализе существующих пьезометрических сетей иногда выявляется ряд существенных недостатков [95]. Зачастую в осуществленных пьезометрических сетях отсутствуют пьезометры перед понурными шпунтами или в начале понуров. Между тем эти пьезометры важны при исследованиях заиления водохранилища и эффективности понуров.

При расстановке пьезометров следует учитывать, что значительная часть их выходит из строя уже в строительный период. В бетонных сооружениях Цимлянской ГЭС после завершения строительства, как показали исследования НИС Гидропроекта

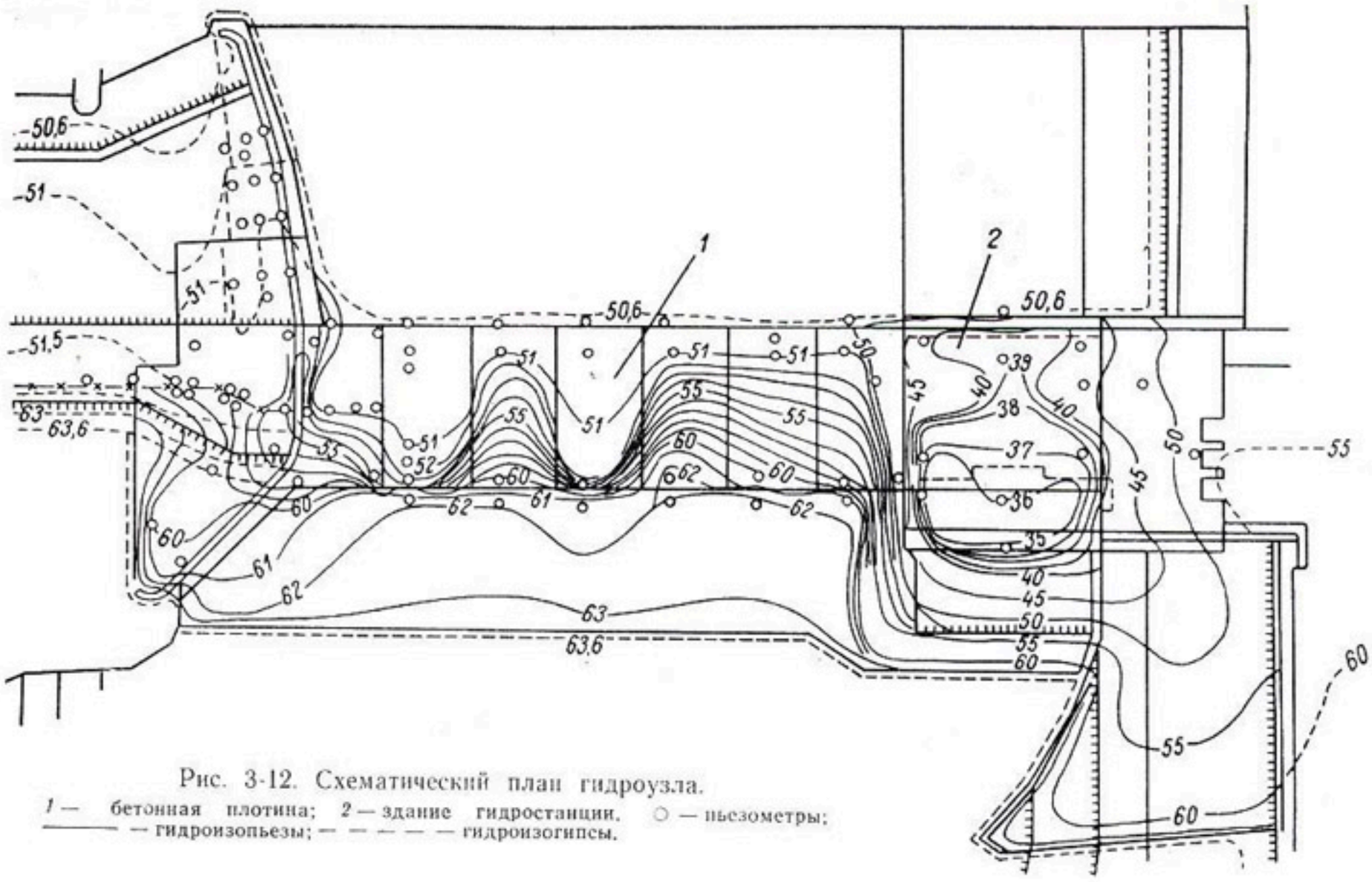


Рис. 3-12. Схематический план гидроузла.

1 — бетонная плотина; *2* — здание гидростанции. ○ — пьезометры; ——— — гидроизопьезы; — — — — — гидроизогипсы.

[43, 95], лишь около 50% безнапорных пьезометров оказались действующими.

В настоящее время имеются попытки дать типовое размещение пьезометров в гидротехнических сооружениях (бетонных и земляных плотинах, судоходных шлюзах) [95].

При некоторых специальных исследованиях, например при исследовании химической суффозии в растворимых породах оснований, глубинные пьезометры устанавливаются в соответствующих зонах области фильтрации для взятия проб воды, содержащей растворенные вещества. Эти исследования освещаются в главе 7.

В гравитационных плотинах на трещиноватых скальных основаниях основные точечные пьезометры устанавливаются выше и ниже дренажей и цементационной завесы. На рис. 3-13, *а* показан пьезометрический створ одной из существующих плотин. При отсутствии дренажа в основании плотины точечные пьезометры устанавливаются в зоне контакта тела плотины с основанием, так как контактная поверхность представляет особый интерес в отношении фильтрации (рис. 3-13, *б*).

Наряду с поперечными пьезометрическими створами устраиваются продольные створы. Они дают возможность оценки работы противофильтрационных устройств: шпунтовых стенок, зубьев и т. д., а также дренажей по длине гидротехнического сооружения. Особенно важно иметь сведения об эффективности цементационной завесы по длине плотины.

Следует отметить, что ввиду неопределенности размеров и расположения трещин в скальных основаниях эпюры противодавления на подошвы плотин имеют сложный характер. Типичным примером в этом отношении является плотина Гувера в США, в которой эпюры противодавления имеют пилообразный вид. Поэтому надо считать правильным, что в поперечном створе плотины, ширина которой по основанию составляет 174 *м*, поставлено 7 пьезометров [43].

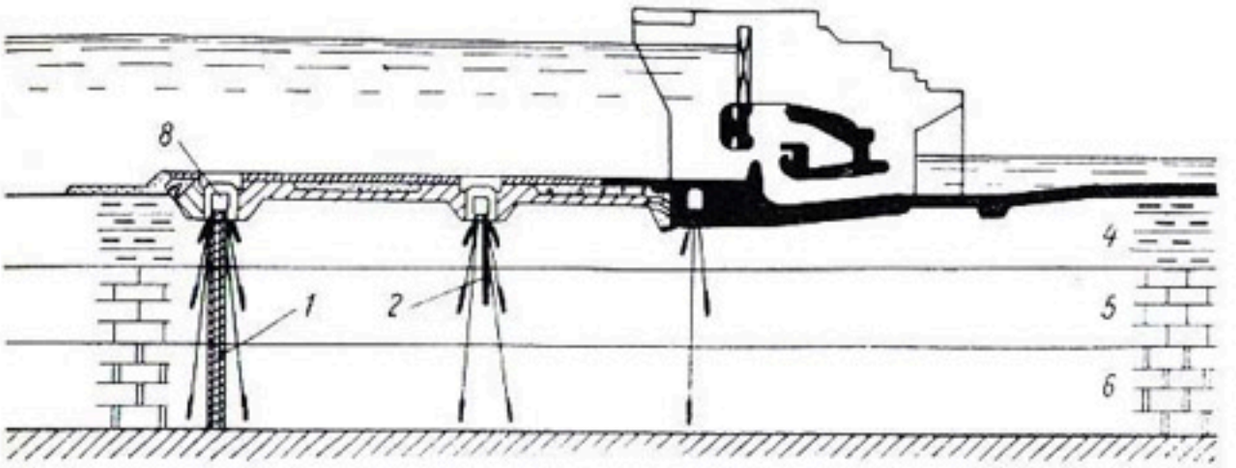
Натурные исследования фильтрации в районах орошения преследуют цель определения режима грунтовых вод в орошаемых массивах — многолетнего и сезонного. Зная тип режима, можно определить способы рационального управления этим режимом.

Наблюдательные скважины закладываются не только на орошаемом участке, но и по обе стороны от него. Створы располагаются обычно по направлению течения грунтовых вод. Они доводятся до реки или до того места, где орошение практически не влияет на режим естественных грунтовых вод.

Представляет интерес наблюдение за фильтрацией грунтовых вод из одиночных крупных каналов. В этом случае пьезометрические створы закладываются с учетом названных выше условий перпендикулярно оси канала. Вблизи канала имеются небольшие уклоны поверхности депрессии, поэтому пьезометры

здесь должны располагаться чаще. Как пример такого расположения пьезометров укажем на пьезометрический створ, осуществленный еще в 20-е годы в Голодной степи [82], в котором пьезометры близ канала расположены на расстоянии 200—300 *м* друг от друга, а далее это расстояние увеличивается до

а)



б)

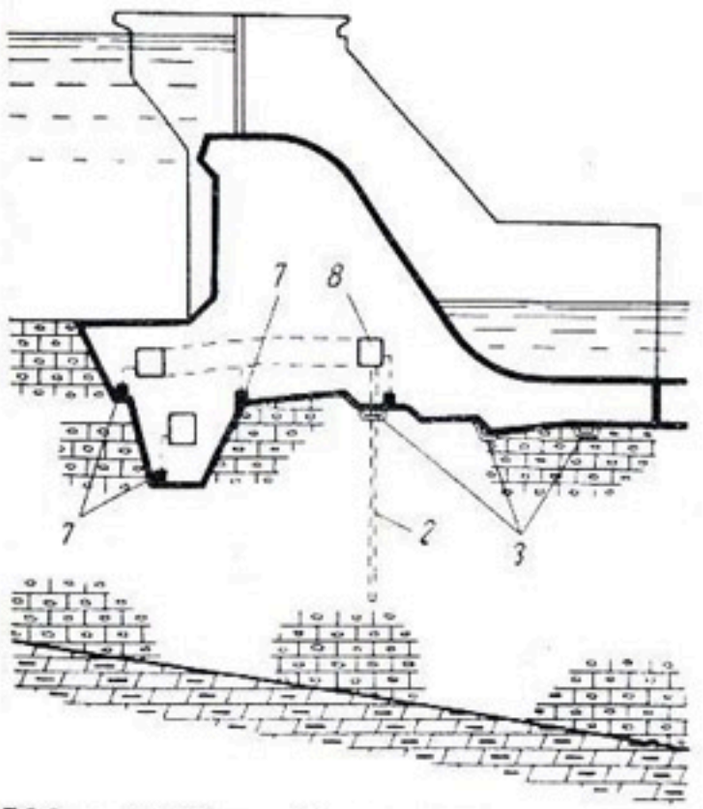


Рис. 3-13. Схемы пьезометрических створов: *а* — створ водосливной плотины, совмещенной со зданием ГЭС (Камская ГЭС); *б* — створ водосливной плотины Уч-Курганской ГЭС; *1* — цементационная завеса; *2* — вертикальный дренаж; *3* — горизонтальный дренаж; *4, 5, 6* — водоносные горизонты (татарский, верхне- и нижнесоликамский); *7* — контактные пьезометры; *8* — потерны.

500 и 1000 *м*. Известные теоретические решения задач о фильтрации из каналов вполне подтверждают подобное размещение пьезометров [11, 82].

При проектировании пьезометрической сети в районе орошения необходимо иметь в виду задачи изучения химического состава грунтовых вод. Как известно, химический состав

грунтовых вод может обусловить засоление земель. Поэтому в состав пьезометрической сети входят скважины для отбора проб воды с целью химического анализа (опытные кусты). Так как химический состав воды изменяется по глубине потока, то на участках, где производится отбор проб, закладывается на расстоянии 1—2 *м* друг от друга несколько скважин, фильтры которых располагаются на различных глубинах.

§ 3-3. Наблюдение за уровнями воды в пьезометрах и контроль их показаний

Частота наблюдений за уровнями воды в пьезометрах зависит от режима грунтовых вод и цели исследований.

В этом отношении режим грунтовых вод характеризуется амплитудой и периодом колебаний уровней грунтовых вод. Частота наблюдений должна быть тем больше, чем меньше период колебаний и чем больше амплитуда колебаний. Объединяя эти два условия, можно сказать приближенно, что частота наблюдений зависит от скорости изменения уровней грунтовых вод. Если скорость изменения уровней составляет несколько миллиметров в сутки, то замеры уровней воды в пьезометрах можно производить с интервалом 3—10 *сут*. При более высоких скоростях изменения уровней, достигающих нескольких сантиметров в сутки, замеры производятся 1 раз в сутки.

Следует отметить, что точность замеров уровней воды в пьезометрах составляет в лучшем случае 2—3 *см*. В периоды прохождения паводков, когда скорость изменения уровней грунтовых вод велика, замеры иногда производятся несколько раз в сутки.

Если источником колебания уровней грунтовых вод является река, то следует иметь в виду, что колебания уровней грунтовых вод по мере удаления от реки затухают. То же можно сказать и в случае, если источником колебаний уровней является искусственный канал или водохранилище. Это следует учитывать при определении частоты замеров.

Путем ориентировочного расчета можно определить порядок повышения уровня грунтовой воды на вертикали, находящейся на некотором расстоянии от уреза воды в реке. При этом для простоты можно полагать, что водоупор является горизонтальным, а поднятие уровня воды в реке происходит мгновенно [1]. Из соответствующей формулы можно получить длину распространения подпора грунтовых вод в течение времени прохождения паводка.

При проектировании гидротехнических узлов целесообразно исследовать изменение во времени уровней грунтовых вод на территориях, примыкающих к гидроузлам, при помощи инте-

---

[1] См., например, [12, стр. 59]

граторов, с учетом постепенного повышения уровня воды в реке, изменения коэффициента фильтрации и т. д. [9, 13].

В районах гидроузлов для определения частоты замера уровней воды в пьезометрах, отвечающей условию правильной оценки закономерности изменения во времени уровней грунтовых вод, наиболее надежен позитивный метод [101, 147]. Согласно этому методу в первые 1—2 года производятся ежедневные замеры в некоторых характерных точках, находящихся в сфере действия превалирующих естественных и искусственных факторов, как-то: характерное строение пласта, влияние гидросооружений и т. д. Замеры уровней в остальных наблюдательных точках производятся один раз в 3—5 *сут*. В дальнейшем устанавливается рациональная частота таких замеров.

Если период колебаний уровней грунтовых вод составляет лишь несколько часов, то замеры уровней в пьезометрах производятся 3 раза в сутки. При значительных ежедневных колебаниях, достигающих нескольких метров, ведутся непрерывные наблюдения при помощи самопишущих приборов.

Изменение напоров в артезианских пластах происходит менее интенсивно, чем в пластах безнапорных, вследствие чего частота замера уровней в пьезометрах или давлений в манометрах будет меньше частоты замера уровней в верхнем безнапорном пласте.

Как показывает опыт, часть пьезометров вследствие заиления их водоприемников или засорения сверху выбывает из строя. Из сопоставления построенных графиков изменения напоров в пьезометрах во времени, а также из сопоставления их с показаниями соседних пьезометров обычно можно сделать заключение о неисправности того или иного пьезометра.

В неисправном пьезометре уровень не реагирует или слабо реагирует на изменение уровня в реке или водохранилище. Часто пьезометры, устанавливаемые при возведении гидротехнических сооружений, оказываются зацементированными в процессе строительства. Можно проверить исправность пьезометра, наливая в него воду. При этом необходимо замерить отметки уровня воды в пьезометре до и после налива. Если уровень воды в пьезометре не понижается через промежуток времени, определяемый расчетом по ориентировочно выбранному значению коэффициента фильтрации с помощью одной из формул, приведенных в § 5-4, то пьезометр неисправен и его следует прочистить. Если засорение произошло в результате цементационных работ, то восстановление пьезометра практически невозможно.

При анализе колебаний пьезометрического уровня следует учитывать возможность влияния изменения атмосферного давления. Д. Тодд [235] объясняет это явление упругими свойствами водоносных пластов. Суть наблюдаемых явлений состоит в следующем. Пусть атмосферное давление p_a возросло

на Δp_a. Тогда пьезометрическая высота h_1 уменьшится до h_2 (рис. 3-14). Изменение уровня воды в пьезометре определится зависимостью:

$$\Delta h = (h_2 - h_1)\, B \frac{\Delta p_a}{\gamma}, \qquad (3\text{-}1)$$

причем γ — удельный вес воды;

$$B = \frac{mE_п}{mE_п - E_в}, \qquad (3\text{-}2)$$

где m — пористость пласта; $E_в$ — модуль упругости воды; $E_п$ — модуль упругости скелета пласта.

Безразмерная величина B, которую можно назвать коэффициентом барометрической эффективности, определяется на основании опытных данных. Этот коэффициент имеет большие значения в водоносных горизонтах, изолированных слабоводопроницаемыми слоями. П. А. Шанкин приводит данные о влиянии атмосферного давления на показания пьезометров в земляной плотине [187]. Имеются некоторые сведения о влиянии атмосферного давления и у других авторов.

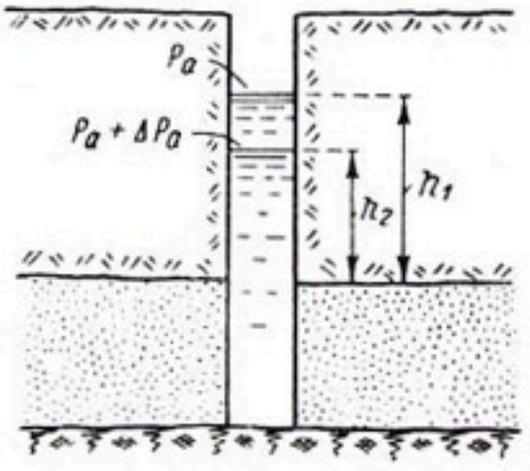


Рис. 3-14. Изменение уровня воды в пьезометре при изменении атмосферного давления.

Однако значение коэффициента B ввиду разнородности пород, слагающих водоносные пласты, а также ввиду влияния искусственных сооружений, прорезающих пласты, может быть определено по формуле (3-2) лишь в редких случаях. Для его определения необходимы опытные данные, полученные в натурных условиях.

§ 3-4. Построение карт гидроизогипс и гидроизопьез по пьезометрическим уровням

В результате натурных наблюдений строятся графики изменения пьезометрических напоров для различных пьезометров в исследуемой области фильтрации. Выбирая из этих графиков показания пьезометров для какой-либо даты, мы имеем для каждой наблюдательной точки значение пьезометрического напора, отсчитываемого от некоторой горизонтальной плоскости сравнения. Если показания различных пьезометров взяты не одновременно, то на основании построенных графиков изменений уровней в пьезометрах во времени эти уровни во всех пьезометрах приводятся к одной дате.

По опытным значениям пьезометрических напоров возможно с той или иной степенью точности построить кривые равных напоров для плана потока, являющиеся гидроизогипсами для безнапорного и гидроизопьезами для напорного потоков.

Остановимся на способах построения карт названных изолиний. При нанесении на план точек наблюдения следует выделить те точки, в которых замеренные пьезометрические уровни не вполне достоверны. Обычно при построении карт гидроизогипс или гидроизопьез точки наблюдения соединяются прямыми линиями и каждый отрезок делится на пропорциональные части в соответствии с отметками уровней воды в соединенных точках. Затем через точки с одинаковыми отметками проводят кривые, которые являются гидроизогипсами или гидроизопьезами.

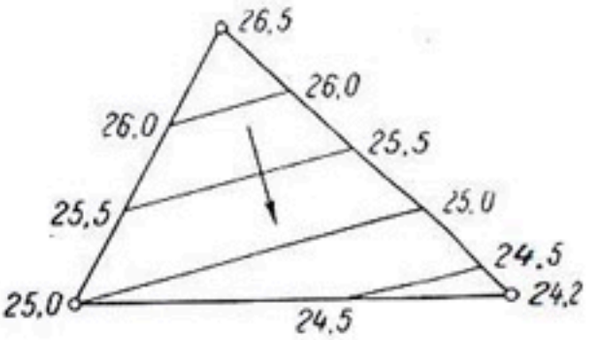


Рис. 3-15. Определение направления фильтрации по уровням трех скважин.

В связи с этим способом можно указать на используемый иногда способ ориентировочного определения направления плановой фильтрации по трем точкам. Положим, что имеются три наблюдательные скважины, в которых отметки уровней воды известны (рис. 3-15). Предполагая

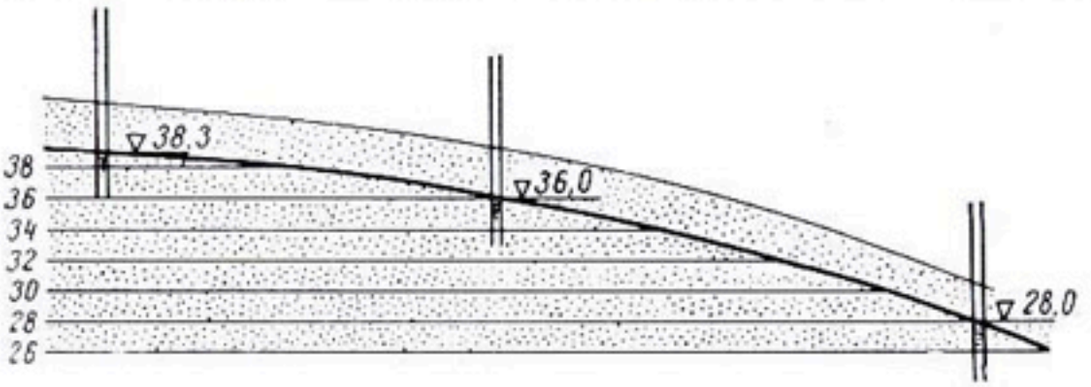


Рис. 3-16. Кривая депрессии в пьезометрическом створе.

линейное падение напора между вершинами треугольника, разбиваем его стороны на пропорциональные части и соединяем прямыми линиями точки с одинаковыми значениями напоров. Эти прямые являются приближенно гидроизогипсами или гидроизопьезами. Далее, проведя нормаль к этим прямым, получаем направление скорости фильтрации в пределах данного треугольника.

В ряде сложных случаев представляется рациональным при построении названных изолиний предварительно построить кривые напоров по пьезометрическим створам. На рис. 3-16 показана кривая депрессии в пьезометрическом створе, построенная на основании показаний пьезометров. Проводя на чертеже

горизонтальные линии на соответствующих отметках до пересечения с кривой депрессии, получаем точки, которые затем переносятся на план. Таким путем по нескольким створам на план наносится ряд точек, соответствующих заданным отметкам. Проведя линии через точки с одинаковыми значениями отметок, получим гидроизогипсы, найденные путем графической криволинейной интерполяции.

В некоторых случаях при достаточном количестве пьезометров построение карт гидроизогипс или гидроизопьез можно производить при помощи экспериментальных методов, например методом ЭГДА. Положим, что на данной территории имеется недостаточное число действующих пьезометрических скважин, как показано на рис. 3-17. В этом случае, пользуясь известной методикой экспериментального исследования плановой фильтрации [9], можно построить гидроизогипсы или гидроизопьезы грунтового потока с учетом всех обстоятельств (граничных условий, формы водоупора, изменения коэффициента фильтрации по площади и т. д.). При этом потенциалы, соответствующие показаниям действующих пьезометров, задаются на модели в тех точках, где расположены пьезометры. Полученная карта изолиний, строго говоря, является экспериментальной. Однако наличие точек с замеренными в натуре уровнями грунтовых вод существенно повышает точность результатов.

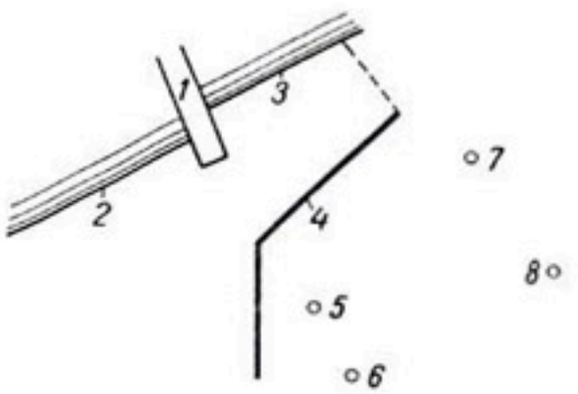


Рис. 3-17. Случай недостаточного количества наблюдательных скважин.

1 — плотина; *2* и *3* — урезы верхнего и нижнего бьефов; *4* — дрена; *5—8* — скважины-пьезометры.

Заметим, что отключая на электрической модели электроды, моделирующие пьезометры, при условии соответствия модели натуре мы должны получить ту же карту гидроизогипс, что и в случае принудительного задания потенциалов в местах расположения пьезометров. Однако практически всегда имеются расхождения между картами изолиний, построенных при наличии электродов, моделирующих пьезометры с заданными потенциалами, и при выключении этих электродов. Чем меньше эти расхождения, тем ближе модель отвечает реальным условиям фильтрации.

При изучении формы потока на основании построенных гидроизогипс или гидроизопьез необходимо иметь в виду, что линии тока образуют ортогональную сетку с названными изолиниями лишь в случае постоянного по площади коэффициента фильтрации. Если коэффициент фильтрации изменяется по горизонтальным направлениям непрерывно, то сетка, образованная линиями равных напоров и линиями тока, не будет

ортогональной. Если же коэффициент фильтрации изменяется в плане прерывисто, то на границах зон с различными значениями коэффициента фильтрации линии равных напоров испытывают преломление, определяемое формулой (2-32). Таким образом, в случае неоднородных грунтов карты гидроизогипс и гидроизопьез не дают полного представления о грунтовых потоках.

Для полной характеристики таких потоков необходимо знать изменение величины коэффициента фильтрации грунта. Конечно, при таких условиях задача построения линий тока значительно усложняется.

Практически область фильтрации можно обычно разделить на зоны с постоянными средними значениями коэффициента фильтрации, как это, например, показано на рис. 3-18. В каждой зоне, где $k=\text{const}$, линии тока строят, исходя из положения ортогональности их линиям равных напоров. На границах названных зон линии тока следуют условию (2-31). При необходимости получения вполне достоверных линий тока приходится прибегать к определению их при помощи индикаторов, как сказано в главе 4.

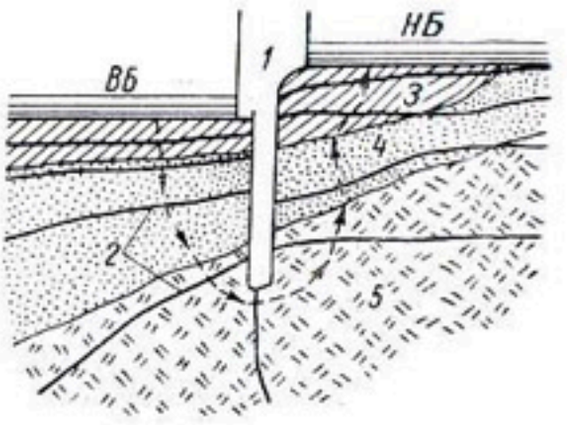


Рис. 3-18. Схема плановой фильтрации в неоднородном пласте.

1 — плотина; *2* — гидроизогипсы; *3*, *4*, *5* — зоны различной водопроницаемости; *ВБ* — верхний бьеф; *НБ* — нижний бьеф.

Знание величин коэффициента фильтрации необходимо при исследовании форм фильтрационных потоков в водоносных пластах, разделяемых слабопроницаемыми слоями.

Гидравлическая связь между пластами осуществляется посредством фильтрации сквозь слабопроницаемый слой, а также через «окна» — отверстия в этом слое.

Окна могут быть обнаружены на основании анализа форм гидроизопьез двух соседних водоносных горизонтов, разделяемых слабопроницаемым слоем, так как в зонах, где имеются окна, напоры в соседних водоносных горизонтах имеют тенденцию к выравниванию.

Подобное постепенное выравнивание напоров наблюдается в случае фильтрации из одного горизонта в другой сквозь разделяющих их слабопроницаемый слой.

Однако полное освещение вопроса о гидравлической связи между водоносными горизонтами требует дополнительных исследований, например при помощи индикаторов. К дополнительным исследованиям относится определение химического состава грунтовых вод в разных горизонтах, а также их температуры и газонасыщенности.

§ 3-5. Некоторые вопросы анализа карт гидроизопьез и гидроизогипс

Карты гидроизогипс и гидроизопьез могут осветить некоторые вопросы фильтрации на изучаемой территории. Эти карты дают наглядное представление о форме грунтового потока, в частности о пространственном характере фильтрации. В зонах сближения изолиний, где наблюдается плавно изменяющаяся фильтрация, коэффициент фильтрации имеет относительно малые значения; в зонах разрежения этих линий коэффициент фильтрации имеет увеличенные значения.

Пространственный характер грунтового потока существенно влияет на распределение напора в основании массивных пло-

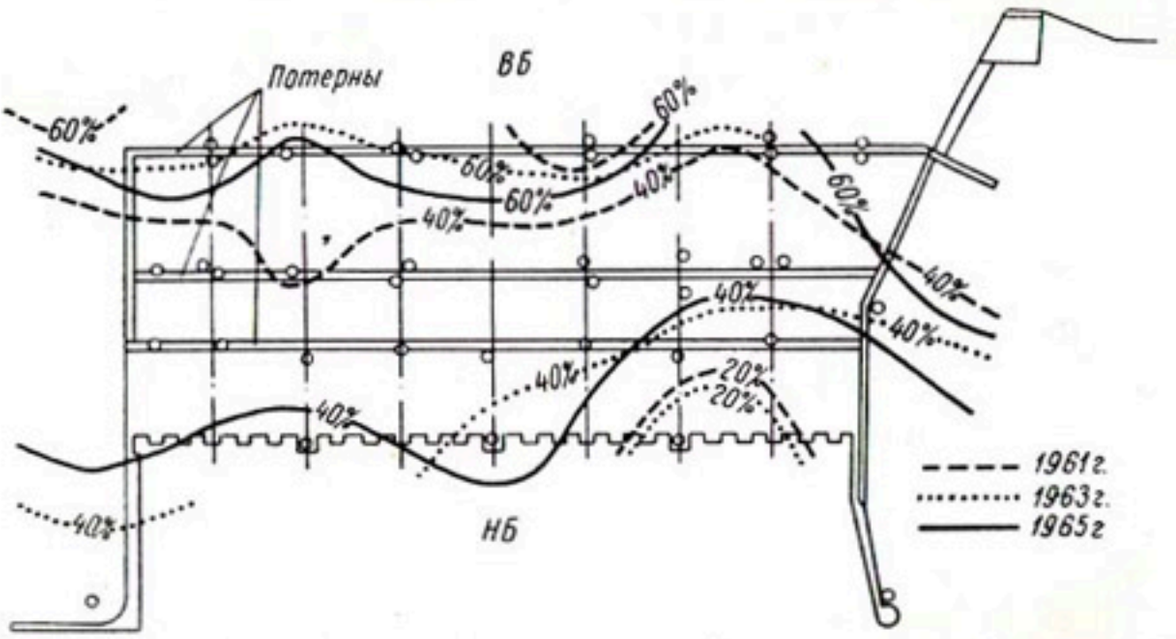


Рис. 3-19. План гидроизопьез верхне-соликамского горизонта Камской ГЭС.

тин. Гидроизопьезы дают возможность оценить работу противофильтрационных и дренажных элементов плотины и помогают выявить слабые места в основаниях плотин. Эффективность конструкции береговых устоев и завес выясняется из рассмотрения карты гидроизогипс в береговом примыкании.

Карты гидроизопьез для различных горизонтов позволяют выяснить гидравлическую связь между ними. На рис. 3-19 и 3-20 представлены карты гидроизопьез для двух горизонтов в основаниях сооружений Камского гидроузла. Приведенные карты гидроизопьез построены по данным среднемесячных показаний пьезометров в период стабильного положения уровней воды в обоих бьефах. Из сопоставления карт видно, что эти горизонты в значительной степени обособлены. Фильтрационный поток в нижне-соликамском горизонте направлен под углом к оси плотины, тогда как поток в верхне-соликамском горизонте имеет направление, перпендикулярное к этой оси. Диагональное направление фильтрации в нижне-соликамском

горизонте объясняется повышенной трещиноватостью нижней левобережной части основания бетонной плотины. Как видно из рисунков, гидроизопьезы в течение четырех лет изменялись,

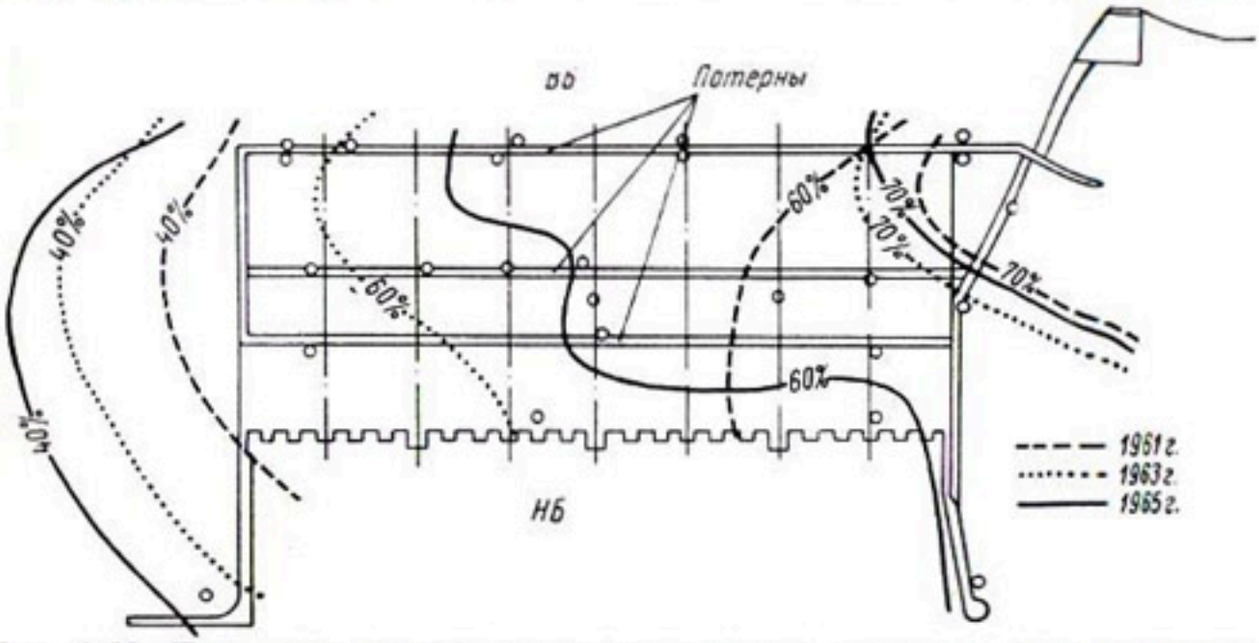


Рис. 3-20. План гидроизопьез нижне-соликамского горизонта Камской ГЭС.

в особенности гидроизопьезы нижне-соликамского горизонта. Это объясняется проведением некоторых мероприятий по защите от фильтрации, а отчасти также изменением во времени

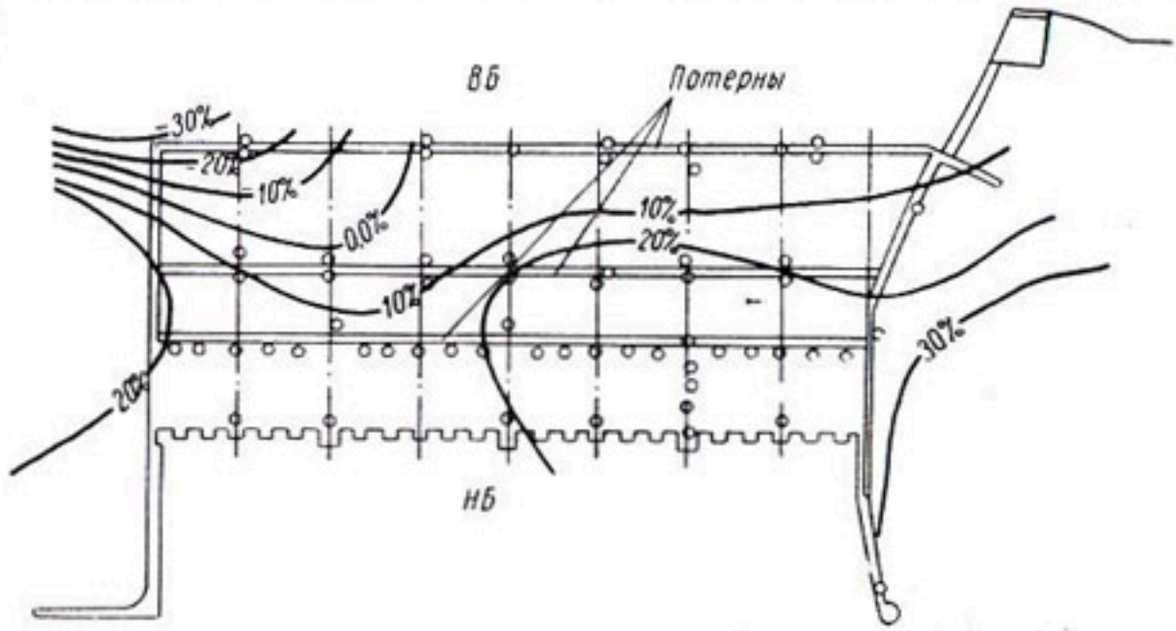


Рис. 3-21. План изолиний разности напоров (в %) между нижне-соликамским и верхне-соликамским горизонтами Камской ГЭС.

коэффициентов фильтрации пород данного горизонта вследствие химической суффозии.

Для выявления гидравлической связи между двумя горизонтами построена по данным 1965 г. карта изолиний разности напоров (рис. 3-21). Из этой карты следует, что в верхнем правобережном углу гидроузла напоры в верхне-соликамском

горизонте выше, чем в нижне-соликамском, а в нижнем левобережном углу наблюдается обратная картина. Таким образом, имеется потенциальная возможность подпитки нижне-соликамского горизонта в верхнем правобережном углу и его разгрузки в нижнем левобережном.

При наличии двух смежных горизонтов, один из которых безнапорный, теоретически только по форме карты гидроизогипс можно судить о связи верхнего горизонта с нижним напорным. В случае выпуклой пьезометрической поверхности данная область является областью питания, а если поверхность вогнутая, то имеется область разгрузки.

Карты гидроизогипс и гидроизопьез, полученные для одного и того же объекта, не бывают идентичными, так как, строго говоря, любая фаза режима грунтовых вод практически никогда не повторяется. Действительно, режим грунтовых вод зависит от сочетаний влияний многочисленных факторов — климатических, геологических и искусственных. Эти группы режимообразующих факторов проявляются в разнообразных формах. В частности, форма гидроизопьез может зависеть от степени выщелачивания пород, слагающих основание, от хода температуры, которая, как показывают исследования [74], влияет на раскрытие швов и трещин в бетонных сооружениях, от атмосферного давления (§ 3-3) и других факторов. Поэтому не следует ожидать полного совпадения карт гидроизогипс и гидроизопьез, полученных для разных лет, хотя общая картина фильтрации в основном должна сохраняться. Тенденция к систематическому изменению названных карт для одной и той же территории при неизменных условиях эксплуатации сооружения обычно свидетельствует о происходящих физико-химических процессах в области фильтрации, например, о размыве пород вследствие механической или химической суффозии, о кольматации дна верхнего бьефа, о выщелачивании противофильтрационной завесы и т. д. Все эти явления накладывают отпечаток на форму гидроизогипс, которые в соответствующих зонах с течением времени разрежаются (при размыве) или сгущаются (при кольматации).

§ 3-6. Формы фильтрационных потоков в земляных плотинах

Изучение форм фильтрационных потоков в земляных плотинах — одна из наиболее часто возникающих задач натурных исследований фильтрации. Эти формы определяются как конструкцией плотин, так и геологическим строением их оснований.

При натурных исследованиях фильтрации в земляных плотинах необходимо иметь качественное предварительное представление о формах фильтрационных потоков в этих плотинах. Теоретический расчет фильтрации в земляных плотинах полу-

чил развитие в трудах Н. Н. Павловского [125], С. Н. Нумерова [11, 12], А. А. Угинчуса [170] и других авторов. Разработанные разными авторами способы расчета дают возможность теоретического построения кривых депрессии главным образом в однородных земляных плотинах различных типов.

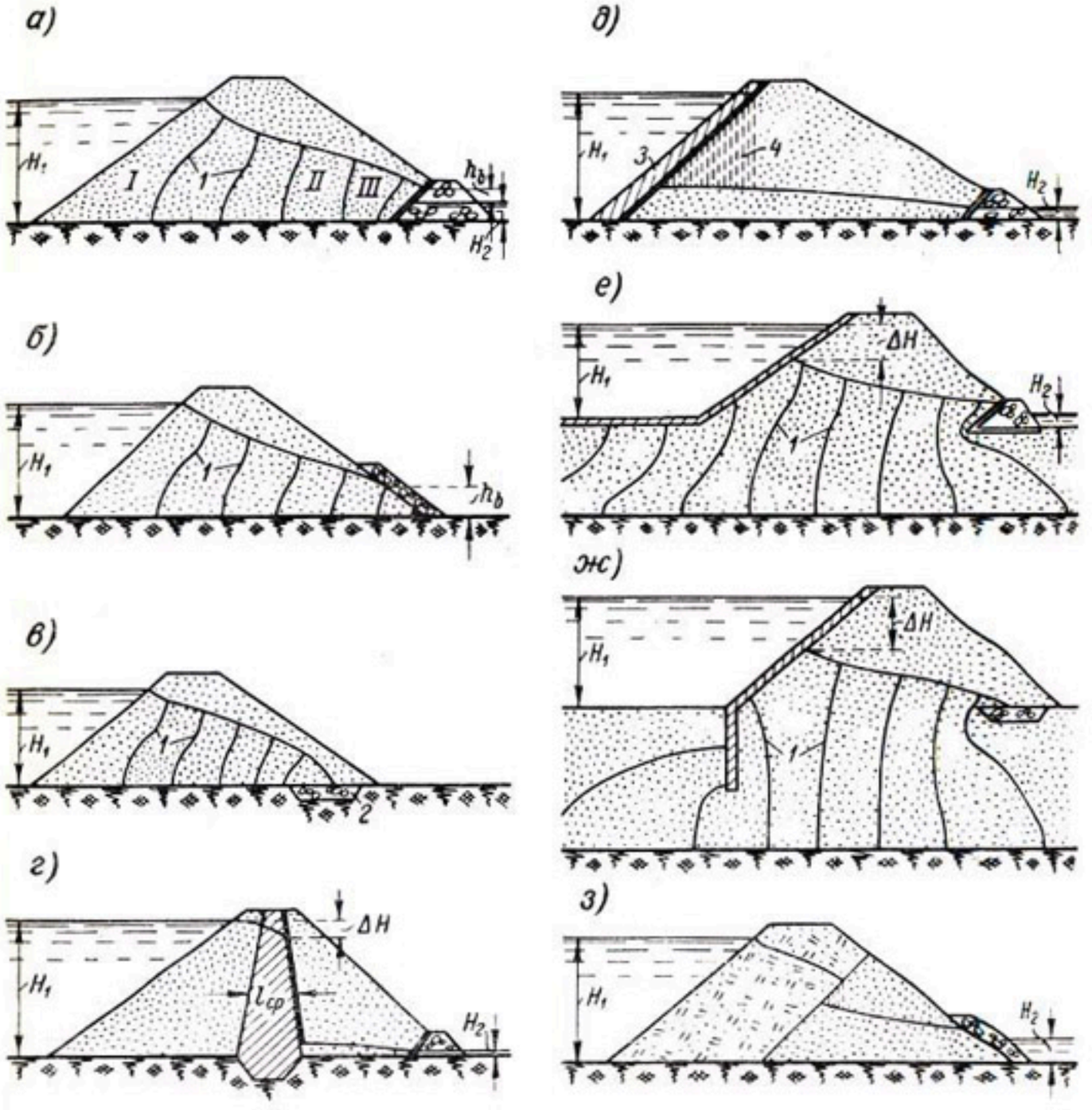


Рис. 3-22. Схемы фильтрации в земляных плотинах: *а* — на непроницаемом основании; *б* — с наклонным дренажем; *в* — с тюфячным дренажем; *г* — в земляной плотине с ядром; *д* — с экраном; *е* — с экраном и понуром; *ж* — с экраном и зубом; *з* — смешанного типа.

1 — линии равных напоров; *2* — дренаж; *3* — экран; *4* — зона просачивания.

На рис. 3-22, *а* изображена схема фильтрации в земляной плотине, стоящей на водонепроницаемом основании и имеющей дренажную призму. Фильтрационный поток в плотине имеет три характерные зоны.

Зона *I* — верховая призма плотины. Здесь линии равных напоров резко искривлены. Граничными линиями равных напоров этой зоны являются линии верхового откоса плотины и снизу по течению — линия, близкая к вертикали и отстоящая на небольшое расстояние от точки пересечения линии уровня воды с верховым откосом.

Средняя зона *II* характеризуется плавно изменяющейся фильтрацией. По способам, предложенным различными авторами для расчета фильтрации в земляных однородных плотинах, в этой зоне можно применить уравнение Дюпюи.

Наконец, зона *III* располагается в низовом клине плотины перед входом в дренажную призму. Здесь линии равных напоров искривляются и наклоняются по мере приближения к верховому откосу дренажной призмы. Кривая депрессии пересекается с линией верхового откоса призмы выше уровня нижнего бьефа, причем образуется поверхность высачивания высотой $h_в$.

Ориентировочно высоту поверхности высачивания можно определить по теоретическим формулам [12, 170]. Очевидно, в дренажной призме отметка горизонта воды равна отметке горизонта воды в нижнем бьефе.

Подобная форма потока будет в плотине с наслонным дренажем (рис. 3-22, *б*). Ввиду отсутствия воды в нижнем бьефе на низовом откосе его мокрая часть будет поверхностью высачивания, определяемой теоретически (см. § 9-5).

При наличии у земляной плотины тюфячного дренажа сказанное выше о первых двух зонах остается в силе. В низовой зоне фильтрационного потока сильно искривлены линии равных напоров (рис. 3-22, *в*). Но форма кривой депрессии во второй и третьей зонах близка к параболе второй степени [125].

На рис. 3-22, *г* представлена схема фильтрации в земляной плотине с центральным ядром из слабоводопроницаемого грунта. В верховой призме плотины кривая депрессии близка в горизонтальной прямой. В ядре кривая депрессии имеет падение ΔH, которое ориентировочно можно оценить по формуле:

$$\Delta H = (0{,}6 - 0{,}8)\, l_{ср}, \qquad (3\text{-}3)$$

где $l_{ср}$ — средняя ширина ядра. На низовой грани ядра имеется поверхность высачивания большой высоты. Грунтовая вода стекает (обычно по слоям обратного фильтра) вниз, и в низовой призме плотины образуется грунтовой поток с малой глубиной. Здесь к фильтрации применимо уравнение Дюпюи.

В плотине с экраном из слабоводопроницаемого грунта на верховом откосе (рис. 3-22, *д*) вода, фильтрующая через экран, падает в виде «дождя» (зона неполного насыщения) вниз и образует грунтовой поток с малыми глубинами, следующий уравнению Дюпюи.

На рис. 3-22, *е* изображена схема фильтрации в земляной плотине с водонепроницаемым экраном и понуром, стоящей на водопроницаемом основании конечной глубины. Здесь характерной величиной является перепад ΔH между уровнем воды в верхнем бьефе и наивысшей точкой кривой депрессии. Этот перепад, характеризующий потери напора вследствие влияния экрана и понура, называется иногда «экранирующим эффектом». Изображенные на рисунке линии равных напоров дают представление о форме фильтрационного потока.

Аналогичный эффект в отношении снижения кривой депрессии дает сочетание экрана с зубом (рис. 3-22, *ж*). Здесь входная и выходная зоны фильтрационного потока характеризуются резко искривленными линиями равных напоров.

На схеме фильтрационного потока в плотине смешанного типа (рис. 3-22, *з*) видно, что поперечный профиль плотины состоит из двух частей: верховой и низовой, причем коэффициент фильтрации верховой части значительно меньше коэффициента фильтрации низовой. Кривая депрессии вследствие этого будет иметь уступ, подобный тому, который образуется в плотине со слабоводопроницаемым экраном (рис. 3-22, *д*). При известном соотношении коэффициентов фильтрации разрыв кривой депрессии при переходе из верхней части в нижнюю заменяется плавным соединением частей кривой депрессии.

Основанные на имеющихся теоретических и натурных исследованиях качественные описания форм кривых депрессии в земляных плотинах относятся к плотинам обычных типов и притом плотинам, не имеющим дефектов. Однако в практике натурных исследований нередко встречаются отклонения от нормальных форм кривых депрессии, обусловленные различными причинами, в частности неоднородностью тела плотины. Нас особенно могут интересовать случаи подъема кривых депрессии в земляных плотинах, поскольку такой подъем влечет за собой опасения за устойчивость плотин. Случаи подъема кривых депрессии часто специально исследуются, и выяснение причин подъема кривых депрессии иногда представляет затруднения. Эти вопросы освещаются в главе 9.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

§ 4-1. Общие сведения о постановке исследований по изучению скоростей фильтрации

Как известно, скорость фильтрации определяется зависимостями:

$$v = kI = \frac{Q}{\omega} = mu. \tag{4-1}$$

Отсюда вытекают три принципиально различных способа определения скорости фильтрации, а именно: по значениям коэффициента фильтрации и градиента напора, по расходу и соответствующей этому расходу площади живого сечения потока и, наконец, по даным о скорости в порах и пористости.

Расчет величины скорости фильтрации по заданному значению градиента напора требует определения величины коэффициента фильтрации. Определению этого коэффициента посвящена глава 5, поэтому на нем мы здесь останавливаться не будем. Заметим только, что на практике при использовании указанной зависимости для оценки относительных изменений величины скорости фильтрации иногда довольствуются данными о распределении градиента напора, полученными с помощью карт гидроизопьез и гидроизогипс (см. главу 3). Вместе с тем из выражения (4-1) вытекает, что такая оценка величины скорости фильтрации правомерна только при условии постоянства коэффициента фильтрации k и неприемлема в случае фильтрационной неоднородности изучаемых пластов, когда данные о распределении напоров не могут однозначно характеризовать фильтрационные свойства грунтов.

Поэтому при исследованиях фильтрационного режима нельзя ограничиваться сведениями лишь о распределении напора, а необходимо еще иметь данные об изменениях величин k и T.

Определение скорости фильтрации по данным о расходе и площади живого сечения контролируемой части пласта может проводиться как по результатам наблюдений непосредственно

в потоке, так и по результатам наблюдений в местах сосредоточенного выхода фильтрационного потока на дневную поверхность. При этом могут быть использованы прямые и косвенные способы измерения расхода. К получившим практическое применение прямым способам измерения можно отнести измерения расхода с помощью приборов типа механических вертушек или приспособлений — водосливов, мерных емкостей и т. д., а к косвенным — метод индикаторов. Наблюдения по определению расхода непосредственно в потоке проводятся с помощью пьезометров или каких-либо специальных горных выработок. Те же пьезометры и горные выработки могут быть использованы и для определения скоростей фильтрации по данным о скорости в порах и пористости породы, причем иногда провести строго границу между двумя этими способами бывает трудно. В ряде случаев для установления соответствия между величиной измеренного тем или иным путем расхода и площадью сечения потока приходится проводить специальные расчеты.

§ 4-2. Определение скоростей фильтрации по данным прямых измерений расходов и скоростей фильтрационных потоков

Прямое измерение фильтрационного расхода непосредственно в потоке с помощью пьезометров, шурфов и т. д. применяется сравнительно редко. Однако из литературы известны отдельные случаи измерения скорости фильтрационного потока с помощью вертушек, устанавливаемых непосредственно в водоприемниках скважин. Так, например, вертушки были применены для измерения скоростей подземного потока при откачке в исследованиях, проводившихся Ч. Мансуром [222]. О глубинных расходомерах упоминается в работах В. А. Сушилина [162] и И. Ф. Бурлая [26]. Заметим, что во всех указанных работах речь идет об измерениях скоростей в период искусственного возмущения потока, когда имеют место относительно высокие значения скоростей фильтрации. Поэтому можно считать, что приведенные примеры не типичны и, как известно из практики, прямое измерение скоростей фильтрации в скважинах подобными приборами пока не получило распространения в подземной гидравлике. Это объясняется большими техническими трудностями, возникающими при попытках измерения таких малых скоростей, какими обычно бывают скорости фильтрационного потока. К тому же установка прибора непосредственно в скважине возможна только при довольно малых размерах измерительного прибора. Весьма вероятно, что в дальнейшем с повышением уровня техники измерений удастся создать достаточно удобные и надежные приборы, но пока для определения скоростей фильтрации и расходов потока большей частью используется индикаторный метод.

При определении скорости фильтрации по данным о расходах на границах питания или разгрузки потока необходимо иметь некоторые сведения также и о толще фильтрационного потока, которые обычно получают по результатам наблюдений за пьезометрами. Однако для контроля только относительных изменений скоростей фильтрации можно ограничиться сведениями о расходах. Расходы фильтрационного потока на его границах регистрируются в тех точках, где выход потока осуществляется через специальные дренажные устройства, а при достаточно благоприятных условиях иногда в местах естественной разгрузки потока, например при наличии сосредоточенных выходов потока на низовых склонах водоподпорных сооружений и т. д. При определении площади живого сечения изучаемого потока большую помощь обычно оказывают планы гидроизопьез и гидроизогипс, о построении которых сказано в предыдущей главе. На основании этих планов, прежде всего, следует оценить ширину полосы потока, определяемую положением граничных линий тока, расход которой фиксируется в процессе наблюдений. В свою очередь планы изоплет, составленные для контрольных сечений, позволяют оценить мощность изучаемого потока. В ряде случаев для определения размеров площади живого сечения потока полезно использовать метод ЭГДА.

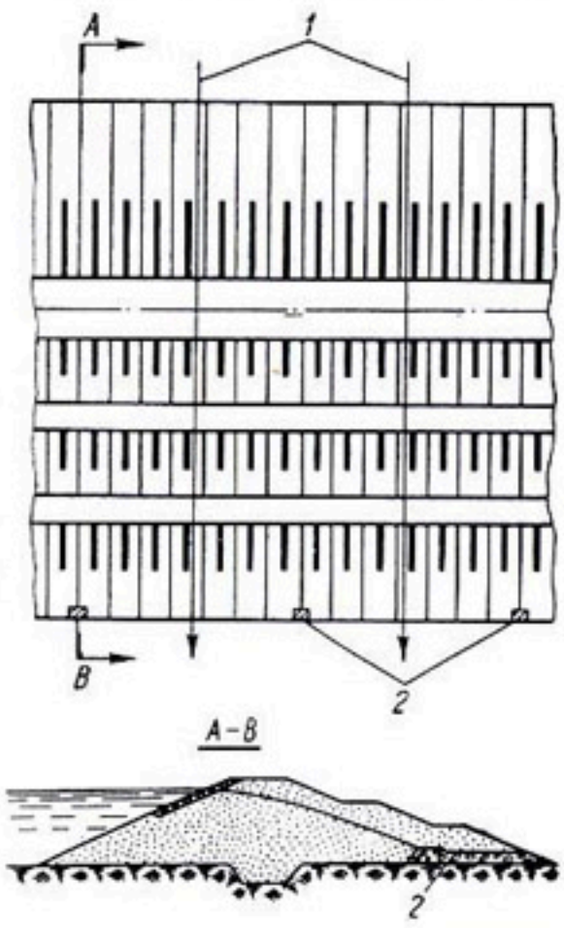


Рис 4-1. Схема к определению скоростей фильтрации по расходам из горизонтального дренажа низовой грани земляной плотины.

1 — линии тока; *2* — водовыпуски.

Измерение фильтрационных расходов в местах сосредоточенного выхода проводится с помощью мерных водосливов, поплавков, а в отдельных случаях и объемным путем. Методика таких измерений описана в работах, посвященных вопросам гидравлики открытых потоков [43, 231].

Для измерения расхода в местах входа фильтрационного потока в пласт используются специальные приборы — фильтромеры. Описание конструкции и принципа действия таких приборов приводится в работах некоторых отечественных и зарубежных авторов [105, 203].

Приведем характерные примеры возможных случаев определения скоростей фильтрации по данным о расходах в местах разгрузки потока.

На рис. 4-1 представлен план и одно из поперечных сечений земляной плотины, на низовом откосе которой имеется горизонтальный трубчатый дренаж. Этот дренаж перехватывает практически весь фильтрационный расход через тело плотины, расположенной на малопроницаемых коренных породах, принимаемых за водоупор.

Измерение фильтрационного расхода в дренажной канаве, в которую сбрасывается расход из трубчатого дренажа на участке потока, ограниченном выделенными на рисунке 4-1 линиями тока *1*, позволяет оценить скорость фильтрации на исследуемом участке.

Второй случай, представленный на рис. 4-2, относится к определению скоростей фильтрации в основании бетонной пло-

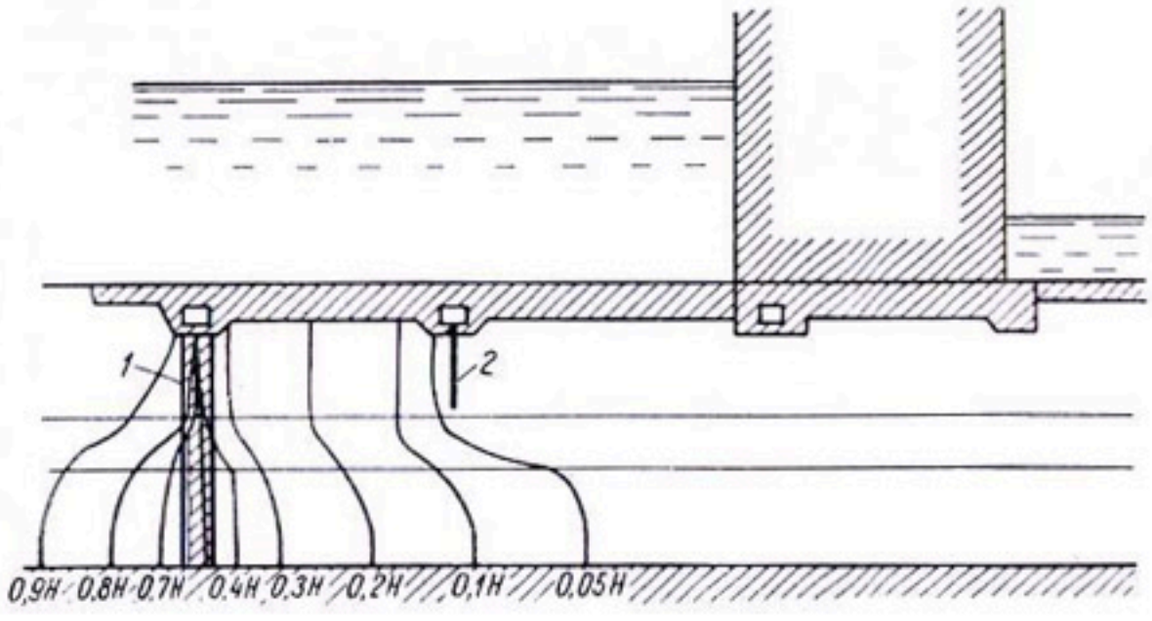


Рис. 4-2. Схема к определению скоростей фильтрации по расходу вертикального дренажа в основании бетонной плотины.
1 — цементационная завеса; *2* — дренаж.

тины, дренируемой системой глубинного вертикального дренажа. Сопоставление результатов наблюдений с материалами исследований по методу ЭГДА позволяет вычислить величину составляющей потока, перехватываемой дренажем, и определить скорости фильтрации.

К особой группе расчетов можно отнести определение скоростей фильтрации в условиях, для которых применимы известные аналитические решения (например, фильтрация через однородную прямоугольную перемычку). Надо сказать, что на практике из-за природной неоднородности грунта такие случаи встречаются сравнительно редко. И потому здесь мы их рассматривать не будем, а ограничимся ссылкой на соответствующую литературу [12, 129, 159 и др]. Некоторые сведения о таких расчетах приводятся в главе 5.

§ 4-3. Общие принципы использования метода индикаторов для определения скоростей фильтрации

Метод индикаторов, основанный на наблюдениях за поведением веществ, введенных в изучаемый поток и обнаруживаемых с помощью соответствующих измерительных приборов, получил широкое распространение при определении скоростей фильтрации. Успешность использования этого метода зависит от степени соответствия между поведением частиц индикатора и изучаемого потока, а также от условий ввода и обнаруживания присутствия частиц индикатора в потоке.[1]

Идеальными индикаторами называются вещества, поведение которых совершенно не отличается от поведения частиц исследуемой жидкости и которые не сорбируются пористой средой. Иначе говоря, идеальные индикаторы по своим физическим характеристикам не должны отличаться от жидкости изучаемого потока и не должны вступать в какие-либо реакции с пористой средой. Используемые на практике индикаторы отвечают понятию идеальных индикаторов только в той или иной степени.

Наблюдения за поведением индикаторов при фильтрационных исследованиях могут осуществлятся как по данным о движении индикаторов, регистрируемом на внешних границах потока, так и по данным наблюдений с помощью пьезометров. Поскольку первый случай можно рассматривать как частный случай исследований с помощью пьезометров, он не требует особого рассмотрения.

Фильтрационные исследования индикаторным методом обычно проводятся способом пусковых или наблюдательных скважин, а иногда теми и другими одновременно.

Определение скорости фильтрации по способу пусковых скважин принципиально соответствует известному методу описания движения по Эйлеру. Этот способ основан на использовании некоторой расчетной зависимости между искомой скоростью и интенсивностью водообмена в водоприемнике изучаемой скважины. Интенсивность водообмена устанавливается по данным

---

[1] В известной степени как разновидность этого метода можно рассматривать способы, основанные на использовании природных особенностей фильтрационного потока. Наиболее общим способом определения направления потока, по-видимому, можно считать известный геофизический метод определения фильтрационных потоков по данным об электрических полях, создаваемых фильтрационным потоком (метод спонтанной поляризации). Подробности методик таких исследований приводятся в специальных руководствах. Возможность использования этого метода на практике ограничивается случаями потоков малой мощности.

Кроме названного метода в очень специфических условиях могут быть также использованы сведения о температуре и химическом составе воды. Это бывает возможным, когда в водоносном горизонте сливаются отдельные потоки, неоднородные по составу. В таких случаях появление на границах пласта вод, имеющих определенную специфику, можно рассматривать как доказательство наличия определенной направленности потока [226].

об изменении с течением времени концентрации индикаторного раствора, введенного в пусковую скважину.

Способ наблюдательных скважин отвечает принципу описания движения по методу Лагранжа и позволяет определить скорость движения жидкости в пористой среде (в порах или трещинах грунта). Этот способ основан на использовании зависимости между скоростью потока и моментом появления индикатора в наблюдательной скважине.

В настоящее время известен ряд различных модификаций этих двух основных способов. Различие между отдельными модификациями способов пусковых и наблюдательных скважин определяется условиями ввода индикатора в изучаемый поток и условиями наблюдения за поведением этого индикатора в контрольных точках. Все особенности запуска и наблюдения индикаторов тесно связаны со свойствами веществ, используемых в качестве индикаторов. По данным, приводимым в современной литературе, в качестве индикаторов при фильтрационных исследованиях использовались многие вещества, начиная от сахара и муки и кончая радиоактивными изотопами [70, 218, 236].

Группируя эти вещества в зависимости от способа их обнаруживания, можно классифицировать индикаторные методы. Так, различают методы: электролитические, основанные на определении концентрации вещества индикатора по измерению электропроводности растворов электролитов; химические, когда присутствие индикатора устанавливается путем химического анализа; колориметрические, связанные с использованием красителей и т. д.

В последнее время все большую популярность приобретает метод радиоактивных индикаторов, основанный на введении в изучаемый поток различных радиоактивных веществ. Благодаря большому количеству радиоактивных изотопов, разнообразию их свойств, сравнительной легкости их обнаруживания радиоактивные индикаторы ближе всего стоят к идеальным индикаторам, и широкое внедрение их в практику исследований задерживается только спецификой работы с радиоактивными веществами, вследствие чего не во всех случаях эти индикаторы являются приемлемыми.

Сравнительные характеристики достоинств индикаторных методов приводятся во многих работах (см., например, [70, 218]). Выбор индикатора проводится с учетом этих характеристик, а также конкретных условий и задач исследования. Такому выбору обычно предшествуют специальные опыты по определению сорбционных свойств исследуемых грунтов и химического состава воды изучаемого потока. В число предварительных экспериментов иногда входит также и проведение пробных запусков индикатора. Последнее главным образом относится к случаю использования индикаторов радиоактивных, при применении которых, ввиду особенностей воздействия радиоактивных

веществ на живые организмы, требуется соблюдение специальных правил по технике безопасности [149]. Поэтому радиоактивные индикаторы следует применять только в тех случаях, когда опыты с другими индикаторами оказываются безуспешными. Подробности организации и проведения исследований фильтрации с помощью индикаторов излагаются в статьях и инструкциях [64, 86, 113, 173, 210].

Ниже рассмотрены только вопросы теории обработки результатов натурных наблюдений для определения скоростных характеристик потока. Эти вопросы имеют большое практическое значение, так как при решении задач, связанных с определением фильтрационных путей, искомые факторы определяются непосредственно результатами опыта. Во всех других случаях, т. е. для определения скоростей фильтрации и скоростей движения воды в порах, требуются соответствующие расчетные зависимости, для получения которых необходимо иметь хотя бы самое общее представление о закономерностях движения индикаторов в фильтрационном потоке. В настоящее время эти закономерности полностью еще не изучены и имеются решения только для отдельных частных случаев движения индикаторов. Некоторые сведения о названных решениях приводятся в § 4-4.

§ 4-4. Основы расчета процесса перемещения индикаторов в пористой среде

Как отмечалось, главной задачей исследований с индикаторами является определение основных кинематических характеристик фильтрационных потоков — скоростей фильтрации и скоростей в порах. Задача определения названных скоростных характеристик по данным об истинном движении частиц жидкости изучаемого потока уже сама по себе представляет существенную трудность для решения. Положение еще более осложняется, когда во внимание приходится принимать собственное перемещение частиц индикатора, вызванное воздействием самых различных факторов, таких, как сорбция, различия в физических свойствах раствора индикатора и жидкости изучаемого потока и т. д. Отсюда можно сделать вывод, что в строгой постановке использование аналитических методов для решения рассматриваемого вопроса в общем случае невозможно. Для получения необходимых расчетных зависимостей требуются упрощения. Принципиально они могут идти по трем направлениям. Во-первых, по пути идеализации структуры пористой среды, во-вторых, по пути упрощения кинематического расчета потока, т. е. схематизации движения частиц исследуемой жидкости и частиц индикатора, и, в-третьих, по пути упрощения расчета силового воздействия на частицы индикатора.

Не приводя описания всех этих упрощений, ограничимся рассмотрением только наиболее распространенного способа ана-

лиза общих закономерностей движения индикатора, основанного на представлениях о фильтрационном потоке.

Представим себе некоторый элементарный параллелепипед с длинами ребер dx, dy и dz, причем будем считать ось X направленной вдоль потока. Пусть индикатор концентрации c, сорбируемый пористой средой, перемещается вместе с фильтрационным потоком, имеющим скорость фильтрации v, которая в общем случае зависит от координат; одновременно на перемещение индикатора влияют молекулярная и конвективная (фильтрационная) диффузии [коэффициенты диффузии $D_м$ и $D_ф(v)$]. Тогда уравнение баланса с учетом явлений сорбции будет иметь вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_м \nabla^2 c + D_ф(v)\nabla^2 c - \operatorname{div}(cv) - \frac{\partial F}{\partial t}, \qquad (4\text{-}2)$$

где ∇^2 — лапласиан; F — функция, характеризующая сорбцию индикатора твердой фазой в единичном объеме грунта; t — время.

Решение этого уравнения представляет большие математические трудности, поэтому обычно принимают ряд упрощающих допущений. Полагают $\operatorname{div} v = 0$, заменяют коэффициент молекулярной и фильтрационной диффузии некоторым единым коэффициентом D. Тогда (4-2) упрощается и переходит в

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\nabla^2 c - v \operatorname{grad} c - \frac{\partial F}{\partial t} \qquad (4\text{-}3)$$

и при $\frac{\partial F}{\partial t} = 0$ принимает вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\nabla^2 c - v \operatorname{grad} c. \qquad (4\text{-}4)$$

Это уравнение также является достаточно сложным, если учесть, что в общем случае коэффициент D может быть величиной переменной, а граничные условия из-за пространственного движения порции индикатора (индикаторного пакета), введенного в поток, достаточно неопределенны.

Не менее сложен анализ движения индикатора с помощью расчетной схемы, в которой пористая среда состоит из системы параллельных капилляров. Здесь решение в аналитическом виде можно получить только для случаев чисто ламинарного или чисто турбулентного движений индикатора, причем даже при этих условиях расчеты с помощью указанных решений представляют известные трудности. В литературе приводятся сведения о попытках применения счетных машин для расчета процесса движения индикаторов [216], но решений, удобных для широкого использования, пока еще не получено.

Из сказанного видно, что получить универсальное решение уравнений движения индикатора нельзя, а решения, полученные для различных огрубленных и приближенных схем, могут весьма

существенно отличаться друг от друга. Поскольку в натуре условия движения реальных индикаторов могут приближаться к различным расчетным схемам, то при анализе имеет смысл выделить наиболее характерные из схем и оценить пределы их применимости. Некоторые соображения по этому поводу приведены ниже.

§ 4-5. Определение скоростей фильтрации способом пусковых скважин

Способ пусковых скважин при фильтрационных исследованиях предназначен для определения локальных значений скоростей фильтрации в отдельных точках изучаемого водоносного пласта. В последние годы делаются попытки использовать названный способ и для определения направления потока [41, 97, 150], но пока в этой области еще не удалось выйти из стадии лабораторных проработок. С помощью способа пусковых скважин устанавливается величина скорости фильтрации непосредственно в месте заложения водоприемника пусковой скважины.

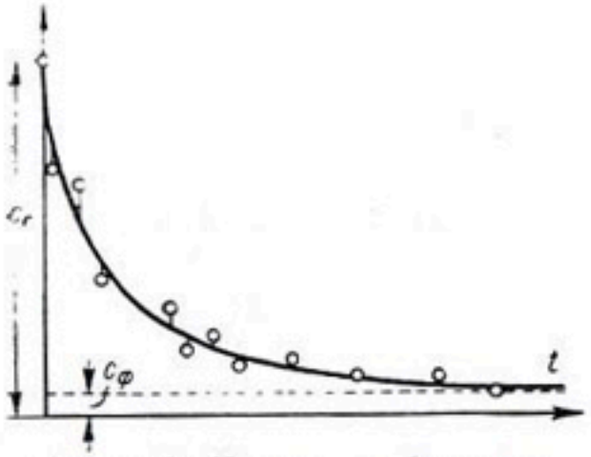


Рис. 4-3. Кривая разбавления.
c_0 — начальная концентрация индикатора; c_ϕ — концентрации вещества индикатора в условиях естественного потока (фон).

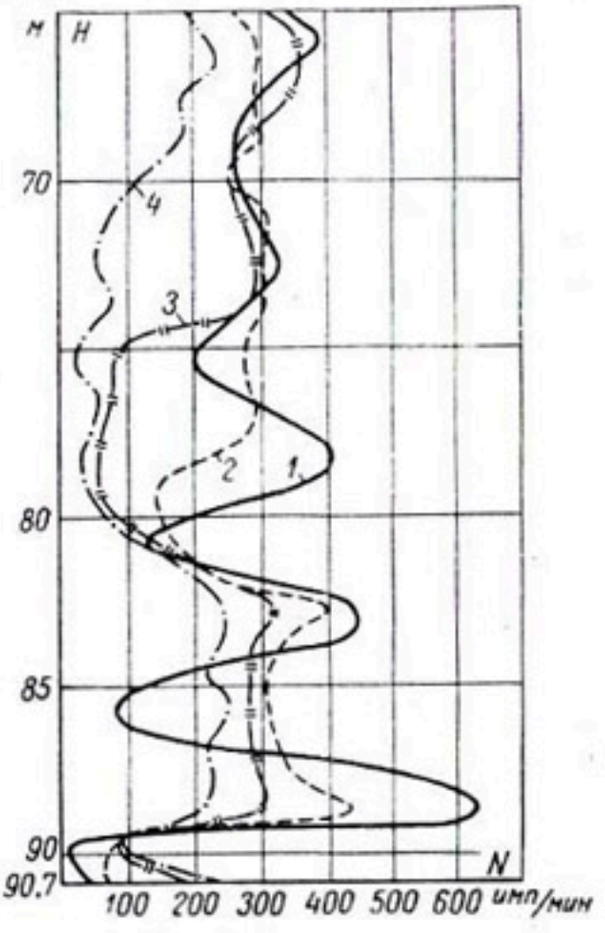


Рис. 4-4. Распределение радиоактивного индикатора по высоте пусковой скважины в различные моменты времени.
1 — при запуске индикатора; *2* — через 3 ч после запуска; *3* — через 24 ч после запуска; *4* — через 96 ч после запуска; *N* — количество импульсов в минуту.

Возможность определения скорости фильтрации по высоте пласта зависит от особенностей оборудования и длины водоприемника пусковой скважины. При малой длине водоприемника определяются только значения скорости фильтрации, осредненные по высоте водоприемника. Если же длина водоприемника зна-

чительна, то с достаточной для практических целей точностью можно найти еще и закономерности распределения скоростей фильтрации по высоте той части пласта, которая контролируется этой скважиной. Последний способ определения скоростей фильтрации, используя геофизическую терминологию, назовем фильтрационным каротажем.

Для определения искомой скорости фильтрации по рассматриваемому способу перед началом опыта в пусковую скважину вводится раствор индикатора, который затем размешивается по высоте исследуемой части пласта или во всем объеме скважины. Во время опыта размешивание повторяется (исключение составляют только опыты по фильтрационному каротажу). В течение всего опыта непрерывно или периодически измеряется концентрация индикатора. Для этого в зависимости от вида используемого индикатора отбираются пробы, либо концентрация индикатора определяется непосредственно в скважине с помощью специальных измерительных приборов. По этим данным можно построить так называемую кривую разбавления индикатора (рис. 4-3) или в случае фильтрационного каротажа — кривые распределения индикатора по глубине скважины (рис. 4-4). При разбросе экспериментальных точек кривую разбавления следует проводить плавно и так, чтобы экспериментальные точки располагались по обе стороны от этой кривой. Переход от данных, полученных во время опыта, к скоростям фильтрации требует обработки, зависящей от конечной цели проводимых вычислений, а именно от того, какие значения скорости определяются, осредненные или дифференцированные по высоте. Учитывая эту специфику, ниже рассмотрим обе задачи отдельно.

А. Определение скорости фильтрации, осредненной по высоте водоприемника

Обязательным условием успешности определения скорости фильтрации в данном случае является регулярное перемешивание индикаторного раствора с тем, чтобы в любой момент времени t индикатор был равномерно распределен по всему рассматриваемому объему. В этом предположении было получено уравнение

$$v = \frac{\pi d}{4t} \ln \frac{c_0 - c_n}{c - c_n}, \qquad (4\text{-}5)$$

где d — диаметр водоприемника скважины; c_0, c и c_n — концентрации индикатора в начальный момент, в момент t и в конце опыта.

Это уравнение справедливо для любых индикаторов при условии, что нет сорбции индикатора стенками скважины и выпадения индикатора в осадок.[1] В данном примере рассматри-

[1] В случае необходимости для проверки соблюдения указанных условий следует проводить контрольные запуски различных индикаторов.

ваем объем воды в пусковой скважине, в котором проводится размешивание индикатора. Скорость потока v в уравнении (4-5) в общем случае не равна скорости фильтрации, которая является фиктивной скоростью, а скорость потока в скважине (где нет пористой среды и все пространство действительно занято потоком) будет реальной скоростью односвязного сплошного потока. Кроме того, сама скважина оказывает дренирующее действие на фильтрационный поток, вследствие чего скорость потока в месте заложения скважины может отличаться от скорости естественного потока [78]. Действие скважины на поток в значительной степени зависит от состояния фильтра скважины, который в определенных условиях может не только способствовать интенсификации потока в месте заложения скважины, но и понизить водопропускную способность пласта. Учитывая эти обстоятельства, расчетное уравнение (4-5) многие исследователи не раз подвергали ревизии. В результате общепринято уравнение (4-5) в форме

$$v = \frac{\pi d}{4ft} \ln \frac{c_0 - c_n}{c - c_n}, \qquad (4\text{-}6)$$

где f — коэффициент, учитывающий дренирующую способность пусковой скважины и имеющий значение от 0,5 до 4 в зависимости от состояния фильтра. Однако состояние фильтров скважин практически оценить весьма трудно. Поэтому, учитывая возможность ошибки при анализе наружных данных, а также приближенный характер уравнения (4-5), представляется оправданным принимать значение коэффициента f равным единице.

Б. Фильтрационный каротаж пусковых скважин

На практике нередки случаи, когда водоприемная часть скважин (или пьезометров) имеет значительную протяженность, достигая иногда 10 *м* и более. В таких условиях может осуществляться послойное определение скоростей фильтрации или, иначе, фильтрационный каротаж скважин. Методика этого каротажа применительно к условиям гидросооружений в течение нескольких лет разрабатывалась во ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева [112].

Фильтрационный каротаж может проводиться как в условиях равномерного начального распределения индикатора по всей высоте исследуемого интервала скважины, так и в условиях точечного запуска индикатора в отдельных точках по высоте. При использовании для опытов пьезометров, ввиду больших технических трудностей, обусловленных малостью диаметра пьезометрических труб (обычно 2—3 дюйма), ввод индикатора в пьезометр не всегда удается выполнить в соответствии с задачами исследований. Прежде всего затруднения возникают при определении изменений концентрации индикатора в ограниченном

объеме воды в пьезометре, так как большинство известных на практике приспособлений для облегчения такого запуска слишком громоздки (например, тахиметр С. А. Коля [78] и др.). В силу этих причин практическое применение в настоящее время получил главным образом распределенный запуск индикатора. В условиях распределенного ввода индикатора определение послойных значений скоростей фильтрации с помощью расчетной зависимости (4-5) можно проводить только в случаях отсутствия переноса вещества индикатора вдоль оси скважины. Вместе с тем опыты показывают, что большей частью избежать такого переноса нельзя. Более того, при исследованиях с помощью пьезометров малого диаметра равномерного начального распределения индикатора по высоте пускового пьезометра иногда вообще не удается получить. Для определения возможности использования в расчетах материалов таких опытов во ВНИИГ проводились специальные исследования. Результаты этих исследований показывают, что ввиду влияния различных побочных факторов, неизбежных в натурных условиях (температурные градиенты, электрохимические эффекты и т. д.), в скважинах достаточно интенсивно происходит самоперемешивание, которое в какой-то степени может заменить принудительное механическое размешивание.

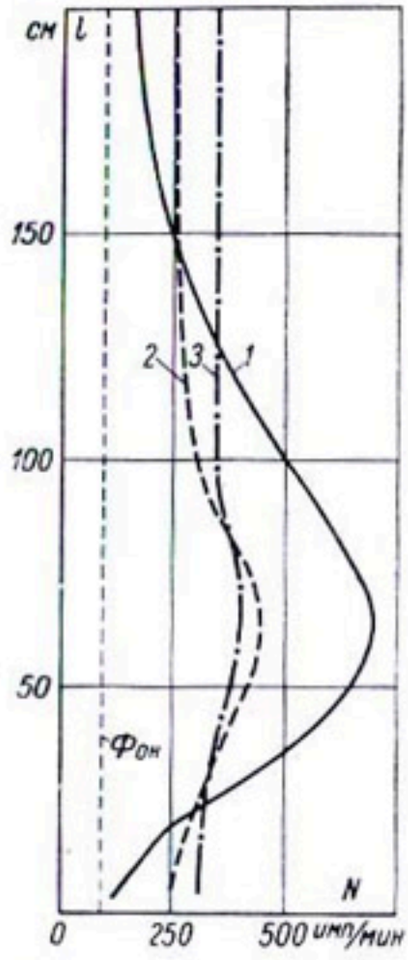


Рис. 4-5. Результаты лабораторного опыта по исследованию условий миграции индикатора в глухой трубе.

1 — при запуске индикатора; *2* — через 2,5 *ч* после запуска; *3* — через 6 *ч* после запуска.

Для иллюстрации этого положения на рис. 4-5 и 4-6 приведены результаты опытов с радиоактивными индикаторами, проведенных ВНИИГ в лабораторных и натурных условиях. В качестве индикатора был выбран J-131. Экспериментальная установка в обоих случаях представляла собой глухую трубу. При исследованиях в лаборатории труба была выполнена из оргстекла и имела высоту 2,5 *м*. В натурных условиях для исследований была использована водопроводная труба длиной 20 *м*. Во время опыта осуществлялся точечный запуск индикатора, а наблюдение за его поведением проводилось путем перемещения коллимированного счетчика по внешней части трубы. Кривые распределения активности индикатора в экспериментальных трубах, полученные в разные моменты времени после запуска индикатора (рис. 4-5 и 4-6), свидетельствуют о том, что практически равномерное распределение раствора индикатора вдоль трубы имеет место

через 4—8 *ч*. Таким образом, существенное влияние процессов самопроизвольного перераспределения вещества вдоль оси скважины можно считать доказанным. Это следует учитывать при обработке экспериментальных данных.

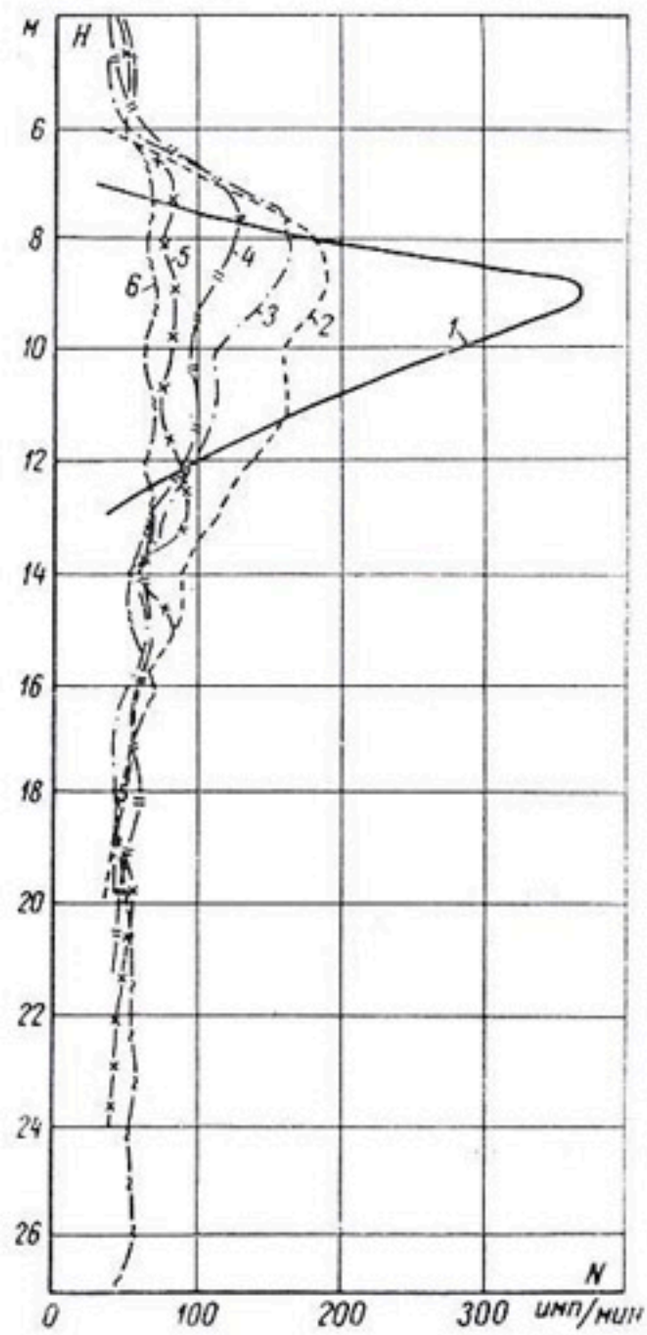


Рис. 4-6. Результаты опыта в натурных условиях по исследованию миграции индикатора в глухой трубе.

1 — при запуске индикатора; *2* — через 1,5 *ч* после запуска; *3* — через 6 *ч* после запуска; *4* — через 13 *ч* после запуска; *5* — через 24 *ч* после запуска; *6* — через 48 *ч* после запуска.

Для определения скоростей фильтрации по кривым распределения индикатора при начальном, недостаточно эффективном размешивании, как это показано на рис. 4-4, следует провести анализ и исключить области, где убыль или рост концентрации может быть прямым следствием процесса миграции индикатора в пусковой скважине. Построение кривой разбавления желательно начинать с того момента, когда распределение индикатора по высоте несколько уравнялось (рис. 4-4, кривая *2*). Очевидно, что такая мера предосторожности еще не исключает возможности переноса вещества индикатора, что хотя уже не изменит относительного расположения участков менее и более интенсивной фильтрации, но может существенно сказаться на абсолютной величине скорости фильтрации. Нередки случаи, когда кривая разбавления довольно заметно отличается от логарифмической кривой.

Тогда возникает вопрос, по какой части кривой следует определять скорость фильтрации. Специальные исследования закономерности перемещения идеальных индикаторов в условиях ламинарного потока при отсутствии принудительного перемешивания показывают, что при расчете по уравнению (4-5) в случае, когда перемешивание недостаточно эффективно, расчетное значение скорости фильтрации будет ниже фактического значения. Это различие увеличивается с увеличением длительности наблюдений за процессом вытеснения индикатора из пусковой скважины. Оптимальные усло-

вия для расчета скорости фильтрации можно найти с помощью выражения:

$$v = \frac{d}{c_0 - c_n} \cdot \frac{\partial c}{\partial t}, \qquad (4\text{-}7)$$

полученного О. Н. Носовой.

Для практических целей использование зависимости (4-7) непосредственно по результатам мгновенных замеров при расчетах может привести к серьезным ошибкам из-за неизбежного при экспериментах разброса опытных точек. Поэтому определение скорости фильтрации следует проводить по зависимости (4-5) для промежутков времени, которые желательно выбирать возможно ближе к моменту наступления относительного равномерного распределения индикатора по высоте пусковой скважины.

Правила определения скорости фильтрации в условиях фильтрационного каротажа можно до известной степени распространить и на случай определения осредненных значений скоростей фильтрации. При этом необходимо при каждом замере контролировать равномерность распределения индикатора по высоте скважины, даже убедившись в равномерности начального распределения индикатора. Расчеты скорости фильтрации в таких случаях также следует проводить по начальным участкам кривой разбавления.

В заключение заметим, что при проведении опытов способом пусковых скважин количество индикатора следует брать минимальным, исходя из условия обеспечения достаточно отчетливых результатов измерений концентраций индикатора. Желательно, чтобы начальная концентрация была в 7—8 раз выше концентрации конечной, при которой опыт прекращается. В отдельных случаях можно довольствоваться соотношением $c_0 = (3 \div 4)\, c_n$. Для J-131 оптимальная концентрация составляет примерно 0,2 *мккюри/л*.

§ 4-6. Определение скоростных характеристик потока способом наблюдательных скважин

При исследовании фильтрации по способу наблюдательных скважин можно определить направление потока и величину скорости в порах, среднюю по длине участка между пусковой и наблюдательными скважинами. Кроме того, с помощью таких опытов при надлежащем оборудовании водоприемников испытуемых скважин иногда проводится исследование проницаемости неоднородной по высоте контролируемой части пласта, а при совместном использовании результатов исследований способами пусковых и наблюдательных скважин определяется также пористость и скорость фильтрации на обследуемом участке.

Для определения искомых характеристик перед началом опыта по рассматриваемому способу в одну из скважин, принятую за пусковую, вводится индикатор, появление которого ожидается в наблюдательных скважинах, расположенных ниже по течению.

Применение способа наблюдательных скважин для исследований является более сложным, чем применение рассмотренного в предыдущем параграфе способа пусковых скважин. К недостаткам способа наблюдательных скважин относится, с одной стороны, сравнительно высокая стоимость работ по оборудованию опытного участка, а с другой — отсутствие полной уверенности в успешности предпринимаемых исследований. Последнее объясняется несоответствием между размерами объема, занятого индикатором, и площадью, контролируемой с помощью наблюдательных скважин. Это иллюстрируется рис. 4-7, где изображен в плане измерительный створ, спроектированный в соответствии с рекомендациями, принятыми в настоящее время [66, 70]. Наблюдательные скважины, расположенные веером ниже пусковой, отстоят от нее на расстоянии 3—5 *м*, вследствие чего минимальное расстояние между наблюдательными скважинами будет не менее 1 *м*. Вместе с тем опыт показывает, что размеры занятого индикатором объема в плане, в случае ввода индикатора в поток без нагнетания в процессе фильтрации на пути 2—5 *м* составят два-три диаметра пусковой скважины, следовательно, индикатор может легко пройти незамеченным. Для повышения вероятности попадания индикатора в наблюдательную скважину проводят специальные расчеты по определению необходимого количества индикатора. В этих расчетах надо учитывать понижение удельной концентрации индикатора в потоке путем размешивания за счет диффузии, неоднородности поля скоростей и т. д., а также возможность потерь вещества индикатора за счет сорбции. Для некоторых индикаторов (краска, соль) в литературе имеются рекомендации для определения ориентировочного объема пусковой порции в типовых случаях [70]. В более сложных условиях, когда приходится проводить расчет исходной порции индикатора, следует предварительно экспериментальным путем определять сорбционную способность грунта исследуемого участка по отношению к выбранному индикатору. Зная по данным эксперимента поглотительную способность единицы объема испытуемого грунта N, ориентировочно определив объем W, отвечающий пути, пройден-

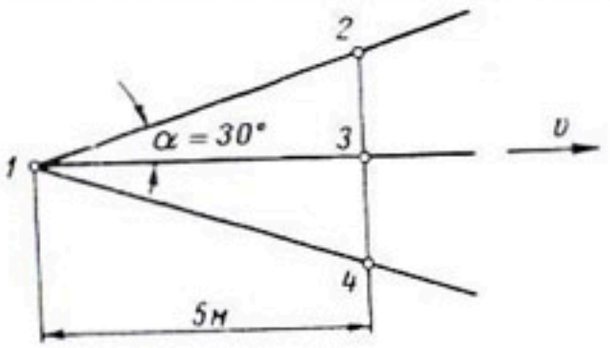


Рис. 4-7. План опытного куста скважин при исследовании способом наблюдательных скважин.

1 — пусковая скважина; *2* — *4* — наблюдательные скважины.

ному индикаторным пакетом, можно оценить общие потери вещества индикатора на сорбцию, как $q_c = NW$.

Для учета размешивающего действия пористой среды и влияния кинематических особенностей фильтрационного потока на концентрацию индикатора можно использовать уравнение:

$$q_0 = q_{0c}\left(2\sqrt{\pi mDt}\right)^3, \tag{4-8}$$

где q_{0c} — минимальное количество индикатора, которое может быть обнаружено прибором в единице объема потока; D — коэффициент фильтрационной диффузии, который ориентировочно можно принять равным $1 \cdot 10^{-2}$ *см*^{2}/*сек*. Общее количество индикатора в пусковой порции будет

$$Q = (q_0 + q_c)V, \tag{4-9}$$

где V — объем пусковой порции.

Учитывая ориентировочность указанных расчетов, в наиболее ответственных случаях величину пусковой порции индикатора принимают заведомо завышенной.

При проведении опытов с веществами, появление которых ниже створа наблюдения нежелательно, по заданной пусковой порции расчетом определяется концентрация вещества в запретной зоне. Расчет при этом следует проводить по формуле $q_{0c} = q_0/2\sqrt{\pi mD_0 x}$, где $D_0 = D/v$, причем, если x выражено в сантиметрах, можно принять $D = 0{,}1$ *см*.

Зная исходное количество вещества индикатора, можно приступить к проведению опытов, а затем и к обработке экспериментальных данных. Обработка материалов исследований по способу наблюдательных скважин зависит от конкретных целей этих исследований.

Для определения направления потока достаточно фиксировать появление индикатора в наблюдательной скважине, что, естественно, определяется непосредственными результатами опыта. Исключение представляет лишь случай одновременного появления индикатора в двух или более наблюдательных скважинах, находящихся на одинаковом расстоянии от пусковой скважины. Способ расчета истинного направления потока для таких условий при определенных предположениях относительно закономерностей перемещения индикатора в пористой среде приводится в работе [106]. Впрочем, учитывая упомянутое выше несоответствие размеров объема, занятого индикатором, и расстояний между наблюдательными скважинами, подобный случай расчета вряд ли может представлять практический интерес, и потому мы рассматривать его здесь не будем.

Совершенно иначе обстоит дело при исследованиях с целью определения величины скорости движения воды в порах. В этих условиях нельзя определить искомую величину непосредственно

по результатам опыта, которые обычно представляют в виде так называемой кривой хода индикатора, изображенной на рис. 4-8.

Для определения искомой скорости следует длину пути l, пройденную индикатором, разделить на расчетное время $t_р$, характеризующее среднюю скорость в порах $u=l/t_р$. Можно показать, что при оценке значений величин l и $t_р$ возникают известные трудности.

При определении длины l обычно приходится ориентироваться на расстояние между точками наблюдения, хотя в действительности частица проходит в порах значительно больший путь L, который некоторые авторы предлагают учитывать так называемым коэффициентом извилистости [202].

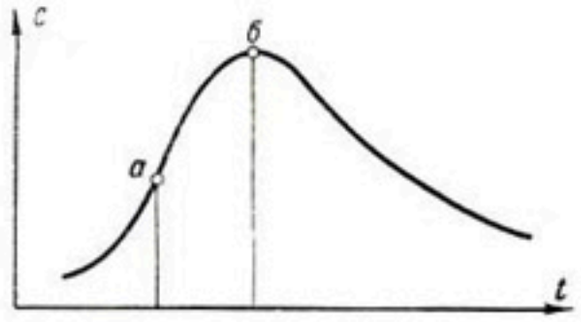


Рис. 4-8. Кривая хода индикатора

В отношении рекомендации по определению расчетного времени $t_р$ по кривой хода индикатора в настоящее время в литературе нет единого мнения. Так, одни авторы предлагают использовать в расчетах время, отвечающее точке перегиба кривой (точка $а$ на рис. 4-8) [20, 70, 86], а другие считают, что $t_р$ определяется положением точки максимума (точка $б$ на рис. 4-8) [17, 154]. На величину l могут оказывать влияние условия движения на рассматриваемом участке и дренирующее влияние скважин.

Учет дренирующего влияния скважин, по данным Н. Н. Веригина [32], имеет практический смысл только для отношений:

$$\frac{r_1}{r_0} \leqslant 100 \quad \text{при} \quad I \geqslant 0{,}01,$$

$$\frac{r_1}{r_0} \leqslant 1000 \quad \text{при} \quad I \geqslant 0{,}0001,$$

где r_1 — расстояние наблюдательной скважины от пусковой, r_0 — радиус пусковой скважины; I — естественный градиент (уклон) потока. В этих случаях ошибка расчета из-за пренебрежения дренирующим эффектом может быть порядка 15—20%. В остальных случаях влияние скважин на пласт можно не принимать во внимание, как это обычно и делают на практике.

Определение фильтрационных характеристик грунта с учетом неравномерности потока проводится в общем случае достаточно сложно [32]. Не приводя здесь расчетных зависимостей, сошлемся только на случай фильтрации в условиях притока к совершенной скважине, где скорость в порах $u=\frac{dr}{dt}=\frac{Q}{2\pi Tmr}$, а $k=\frac{1}{2St}(r_1^2-r_0^2)\,m\ln\frac{R}{r}$, r — расстояние от рассматриваемой

скважины до точки определения скорости; T — мощность пласта; R — радиус кругового контура питания.

В свете сделанных выше замечаний представляется, что общие рекомендации в таких условиях неприемлемы. Определение расчетного времени $t_р$ следует проводить на основании анализа вида полученной кривой. Если эта кривая имеет форму, близкую к кривой Гаусса, то среднюю скорость движения воды в порах можно определить по данным о перемещении моды. Сильно деформированная и растянутая кривая хода индикатора может быть следствием явлений сорбции или указателем отсутствия перемешивания индикатора. В этих условиях, очевидно, возможно определить только значение наибольшей скорости движения индикаторных частиц, которую условно можно считать близкой к максимальной скорости движения воды в порах.

Подытоживая все сказанное о способе наблюдательных скважин, следует отметить, что, учитывая известную условность полученных результатов, определение скоростных характеристик потока следует проводить с округлением в сторону увеличения коэффициента запаса для расчета.

§ 4-7. Общие замечания об использовании индикаторных методов при натурных исследованиях фильтрации

Индикаторные методы исследования скоростей фильтрации получили широкое признание в практике натурных фильтрационных исследований. Из литературы известно много примеров успешного применения индикаторов. Так, например, Кону с помощью флюоресцеина удалось установить наличие взаимосвязи между бассейнами Дуная и Рейна [70]. Очень интересные исследования по определению скорости подземного потока с помощью растворенного в воде газа (аргона и азота) были проведены в Японии. Ряд удачных опытов был осуществлен с солевыми индикаторами [46] и с красителями [60] на гидротехнических сооружениях. Большую известность получили опыты с радиоактивными индикаторами [227]. Среди них можно отметить успешное исследование притоков Нила с помощью радиоактивного рубидия, определение путей сосредоточенной фильтрации на строительстве плотины в Серр-Понсон во Франции [215], исследование в ГДР качества экрана земляной плотины, предназначенной для удержания паводковых вод [228], опыты по использованию трития для изучения условий фильтрации, использование радиоактивного йода в мелиоративных исследованиях [14, 45] и т. д.

В гидротехническом строительстве в СССР радиоактивные индикаторы были использованы для исследований фильтрации в откосах перемычки ограждения котлована на строительстве Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС [72], на канале имени Москвы [140], на Горьковской и Камской ГЭС [173] и т. д.

Таким образом, практическое значение применения метода индикаторов для определения скоростей фильтрации не вызывает сомнений. Вместе с тем на практике нередки случаи, когда с помощью индикаторов не удается получить желаемых результатов. По-видимому, таких случаев несравненно больше, чем успешно проведенных исследований, и упоминания о неудачах иногда встречаются в литературе, например в [215]. Причины таких неудач могут быть самые различные. Так, например, успешность исследований способом наблюдательных скважин во многом предопределяется рациональным расположением скважин наблюдательного створа. Наблюдательные скважины не только должны быть расположены ниже по течению, но желательно, чтобы водоприемники наблюдательных скважин контролировали всю толщу исследуемого пласта, а расстояния между ними были меньше размеров индикаторного пакета в плане.

По техническим причинам этим требованиям не всегда удается удовлетворить, поэтому для увеличения размеров объема, занятого индикатором, целесообразно во время запуска производить нагнетание индикатора. В некоторых случаях имеет смысл проводить исследования в два этапа, а именно: сперва произвести опыт при откачках из наблюдательных скважин с тем, чтобы повысить вероятность обнаруживания индикатора, затем, если опыт удался, повторить запуск индикатора и провести наблюдения за поведением индикатора в естественном потоке. Такой порядок проведения исследований уменьшает трудоемкость опыта, поскольку организация наблюдений за появлением индикатора в условиях невозмущенного потока обычно требует круглосуточных дежурств.

При проведении исследований на ранее уже эксплуатировавшемся створе скважин перед началом опытов следует провести очистку скважин. Это особенно важно при использовании метода пусковых скважин. Для этого метода можно рекомендовать в качестве контроля пробный запуск индикатора до очистки скважины. Увеличение интенсивности вымыва индикатора после чистки водоприемника свидетельствует о наличии заиления. Впрочем, такую проверку целесообразно проводить только в случае самораспадающихся индикаторов, таких, как радиоактивные изотопы с малым периодом полураспада, ибо в противном случае скважина может оказаться непригодной для повторного запуска.

Большое значение для исследований имеют также величина начальной порции индикатора и способ введения индикатора в поток. Если общее количество индикатора определяется из условий возможности детектирования его в наблюдательной скважине, то концентрации при запуске устанавливаются из условия наибольшего соответствия физических свойств раствора индикатора и жидкости. При нарушении этого требования возможно выпадение индикатора в осадок в пусковой скважине, осажде-

ние индикатора на дно скважины и кольматация фильтра скважины.

Одной из причин неудачи опытов с индикаторами может быть сорбция индикатора грунтами. В § 4-6 отмечалась необходимость предварительных исследований для определения сорбционных свойств грунтов. Результаты таких исследований в отдельных случаях могут оказаться недостаточно надежными из-за невозможности учета в лаборатории всего многообразия природных факторов. Поэтому опыты по методу наблюдательных скважин при неудаче с каким-либо индикатором следует провести повторно с другим индикатором.

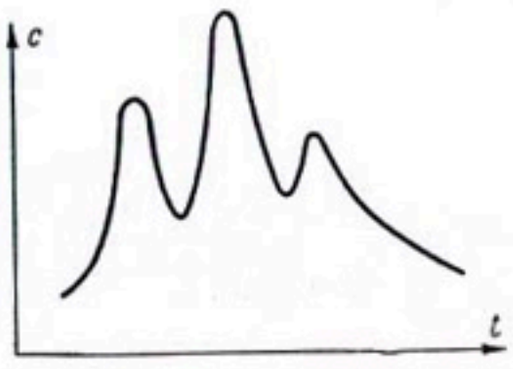


Рис. 4-9. Кривая хода индикатора при исследованиях в многослойном пласте.

При расчетах скорости фильтрации по способам пусковых и наблюдательных скважин на практике иногда не удается добиться достаточно точных результатов. Кроме неудовлетворительного состояния фильтра, отрицательную роль играет миграция раствора индикатора из скважины вследствие молекулярной диффузии, сорбция индикатора в скважине и другие явления. Сорбцию индикатора в скважине можно оценить экспериментально, воспроизводя в лаборатории условия водообмена в водоприемнике, а также откорректировав результаты опытов путем запуска разных индикаторов. Некоторые данные о влиянии диффузии индикатора в потоке приводятся в [286], где показано, что такое влияние будет ощутимо лишь при значениях скорости фильтрации порядка 0,1 *см/сут*, т. е. в подавляющем большинстве случаев диффузией практически можно пренебречь.

Для более полной характеристики исследуемого пласта целесообразно проводить опыты способами пусковых и наблюдательных скважин совместно. Это дает возможность оценить степень однородности пласта и величину пористости. При фильтрационном каротаже можно контролировать еще и герметичность стенок пьезометрической трубы.

В заключение отметим некоторые особенности определения скоростей фильтрации в слоистых грунтах. При использовании метода наблюдательных скважин слоистость пласта может сказаться в появлении на кривой хода индикатора вторичных максимумов (рис. 4-9). По этим максимумам следует определить частные значения скорости течения в порах, которые характеризуют пласт. Определение же скорости потока как средней из этих частных скоростей [70] представляется неоправданным.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

§ 5-1. Задачи исследований и пути их решения

Определению коэффициента фильтрации всегда уделялось очень большое внимание, и осветить подробно все аспекты этого вопроса в рамках данной главы не представляется возможным. Поэтому попытаемся изложить в самых общих чертах только основные способы определения искомого коэффициента, наиболее интересные для натурных исследований фильтрации.

Известные в практике фильтрационных исследований способы определения коэффициентов фильтрации можно классифицировать по ряду признаков, а именно: по условиям проведения исследований (лабораторных и натурных), по степени представительности полученной характеристики для пласта (локальной и интегральной), по характеру изучаемого пласта и по условиям возмущения потока.

Последняя классификация — самая сложная, поскольку в ней учитываются условия передачи возмущений (вид горных выработок, число их и т. д.), режим распространений возмущений (установившийся и неустановившийся), условия залегания пласта и многие другие факторы.

Кроме указанных классификаций, принципиально можно различать также способы определения коэффициента фильтрации по данным о скорости фильтрации и по данным о скорости в порах. В последнем случае способы определения коэффициента фильтрации имеют некоторую специфику, будучи тесно связаны с определением пористости породы.

К таким способам можно отнести определение коэффициента фильтрации по данным о наливах и нагнетаниях в неводонасыщенный грунт и определение скоростей в порах с помощью индикаторов.

Из практики известно, что непосредственное определение коэффициента фильтрации по результатам опыта возможно лишь

в исключительных случаях, а вообще для определения искомого коэффициента приходится проводить специальные расчеты.

Обычно во время опыта по определению фильтрационных характеристик грунта непосредственно измеряемыми параметрами являются расход и напор. Что же касается других факторов, влияющих на расчет величины коэффициента фильтрации, как-то: размеров рабочей части горной выработки, через которую осуществляется воздействие на поток, условий заложения пласта, степени его однородности, условий на границах испытуемого пласта и т. д., то все эти сведения часто бывают не очень надежными, а иногда и вовсе отсутствуют. Таким образом, исследователь, располагая весьма скудными данными, нередко бывает поставлен перед необходимостью почти произвольного выбора расчетной схемы и соответствующей ей зависимости. Надо сказать, что таких зависимостей в настоящее время накопилось много, так что выбор наилучшей зависимости для данных конкретных условий представляет иногда существенные трудности.

При разработке расчетной схемы, используя имеющиеся сведения по геологии, необходимо определить, является ли исследуемый пласт ограниченным по высоте или в плане, оценить возможности взаимосвязи пласта с каким-либо другим водоносным горизонтом, установить условия на границах пласта и определить возможность влияния инфильтрации или испарения на измеряемый во время опыта расход. Следует также охарактеризовать рабочую часть горной выработки, оценить степень несовершенства ее, а в случае работы системы одиночных выработок определить условия их взаимодействия.

Особую специфику имеют расчеты по данным наблюдений за пьезометрами; пьезометрические скважины отличаются малыми поперечными размерами, что, с одной стороны, накладывает определенные ограничения на возможность применения известных методов исследований, а с другой стороны, позволяет использовать некоторые допущения, неприемлемые в других условиях.

Общие сведения о наиболее распространенных способах расчета коэффициента фильтрации при различных условиях опробования пласта приводятся в данной главе. При этом в соответствии с принятым планом изложения к типовым случаям определения коэффициента фильтрации по данным о скоростях отнесены такие исследования, при которых возмущение потока осуществляется только с целью оценки величины коэффициента фильтрации.

Очевидно, что рассматриваемая методика определения искомого коэффициента распространяется и на случай расчета коэффициента фильтрации по скоростям фильтрации, полученным в результате режимных наблюдений, если при этом имеются все необходимые для расчета исходные данные.

§ 5-2. Определение коэффициента фильтрации по откачкам и нагнетаниям

На использовании результатов наблюдений за фильтрацией к скважинам основаны весьма распространенные способы определения коэффициента фильтрации. Благодаря значительному сгущению линий тока у действующей скважины полученное значение коэффициента фильтрации характеризует главным образом фильтрационные свойства грунта вблизи испытуемой скважины. Это следует учитывать при анализе результатов исследований пластов с беспорядочной неоднородностью. Основным недостатком опытов со скважинами является зависимость опытных данных от состояния фильтра действующих скважин и грунта в призабойной зоне, часто нарушенного при бурении и промывке (или продувке). Поэтому рекомендуется иметь наблюдательные скважины (так называемые кустовые откачки и нагнетания).

Расчетные зависимости для определения коэффициента фильтрации по результатам откачек и нагнетаний в условиях установившегося и неустановившегося режимов для пластов ограниченной и неограниченной мощности в разрезе и для потоков напорного и безнапорного приведены в табл. 5-1 и 5-2. Указанные в них формулы могут быть использованы как при откачках из скважин, так и при нагнетаниях в пласт.

Напомним, что расчет неустановившегося фильтрационного потока имеет известную специфику, обусловленную особенностями движения жидкости в пористой среде (глава 2). При этом ввиду принятого в теории фильтрации пренебрежения силами инерции необходимость в уравнениях неустановившегося движения появляется только при наличии деформаций потока, пористой среды и жидкости с течением времени. Во всех остальных случаях расчет неустановившегося фильтрационного потока, т. е. потока, в каждой точке которого с течением времени напор изменяется, проводится по уравнениям установившегося движения. Иначе говоря, неустановившийся поток рассматривается как следствие мгновенной смены стационарных потоков (метод смены стационарных состояний [11]). Прямое непрерывное измерение меняющихся расходов и напоров, как и определение фильтрационного расхода в данный момент времени, не всегда возможно, поэтому возникает задача определения искомых характеристик пласта в тех случаях, когда заданы только общие закономерности изменения граничных условий. Простейшим примером расчетных зависимостей подобного типа, полученных с учетом аккумулирующей способности скважины в предположении недеформируемости пористой среды и фильтрационного потока, является формула (5-23). Более сложные зависимости приводятся в соответствующей литературе [25, 32]. Во всех этих зависимостях при известной форме залегания пласта, заданных

Таблица 5-1

Формулы для определения коэффициента фильтрации при опытах со скважинами
(Установившийся режим)

Тип скважины	Расчетная зависимость по результатам наблюдений за скважинами		
	Центральная	Наблюдательная	Наблюдательные (две)
А. Напорный поток ограниченной мощности			
Совершенная	$k = \frac{Q \ln \frac{2b}{r_0}}{2\pi T S_0}$ (5-1)	$k = \frac{Q \ln \frac{r_1}{r_0}}{2\pi T (S_0 - S_1)}$ (5-2)	$k = \frac{Q \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi T (S_1 - S_2)}$ (5-3)
Несовершенная $\frac{l}{T} \geqslant 0{,}1$	$k = \frac{Q\left(\ln \frac{R}{r_0} + 0{,}5\Phi_0\right)}{2\pi T S_0}$ (5-4)	$k = \frac{Q\left[\ln \frac{r_1}{r_0} + 0{,}5(\Phi_0 - \Phi_1)\right]}{2\pi T (S_0 - S_1)}$ (5-5)	$k = \frac{Q\left[\ln \frac{r_2}{r_1} + 0{,}5(\Phi_1 - \Phi_2)\right]}{2\pi T (S_1 - S_2)}$ (5-6)
Б. Безнапорный поток ограниченной мощности			
Совершенная	$k = \frac{Q \ln \frac{R}{r_0}}{\pi S (2H_0 - S_0)}$ (5-7)	$k = \frac{Q \ln \frac{r_1}{r_0}}{\pi (S_0 - S_1)(2H_0 - S_0 - S_1)}$ (5-8)	$k = \frac{Q \ln \frac{r_2}{r_1}}{\pi (S_1 - S_2)(2H_0 - S_1 - S_2)}$ (5-9)
Несовершенная $\frac{l}{T} \geqslant 0{,}1$	$k = \frac{Q\left(\ln \frac{R}{r_0} + 0{,}5\Phi_0\right)}{\pi S_0 (2H_0 - S_0)}$ (5-10)	$k = \frac{Q\left[\ln \frac{r_1}{r_0} + 0{,}5(\Phi_0 - \Phi_1)\right]}{\pi (S_0 - S_1)(2H_0 - S_0 - S_1)}$ (5-11)	$k = \frac{Q\left[\ln \frac{r_2}{r_1} + 0{,}5(\Phi_1 - \Phi_2)\right]}{\pi (S_1 - S_2)(2H_0 - S_1 - S_2)}$ (5-12)

Продолжение табл. 5 1

Тип скважины	Расчетная зависимость по результатам наблюдений за скважинами		
	Центральная	Наблюдательная	Наблюдательные (две)
	В. Напорный поток неограниченной мощности		
$\frac{l}{T} \leqslant 0{,}1$	$k = \frac{Q \ln\left(1{,}47 \frac{l}{\zeta r_0}\right)}{2\pi l S_0}$ (5-13)	$k = \frac{Q \ln\left(1{,}47 \frac{r_1}{r_0}\right)}{2\pi l (S_0 - S_1)}$ (5-14)	$k = \frac{Q \ln\left(1{,}47 \frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi l (S_1 - S_2)}$ (5-15)
	Г. Безнапорный поток неограниченной мощности		
	$k = \frac{Q}{2\pi l S} \Phi_N\left(\frac{l}{\zeta r_0}\right)$ (5-16)	$k = \frac{Q}{2\pi l (S_0 - S_1)}\left[\Phi_N\left(\frac{l}{\zeta r_0}\right) - \Phi_N\left(\frac{l}{\zeta r_1}\right)\right]$ (5-17)	$k = \frac{Q}{2\pi l (S_1 - S_2)}\left[\Phi_N\left(\frac{l}{\zeta r_1}\right) - \Phi_N\left(\frac{l}{\zeta r_2}\right)\right]$ (5-18)

Примечание. $\Phi_{0,\,1,\,2,}$ — фильтрационное сопротивление несовершенной скважины (значения приведены в табл. 5-3); $\Phi_N\left(\frac{l}{\zeta r}\right) = \operatorname{arsh}\left(2\frac{l}{\zeta r}\right) - \sqrt{1 + 0{,}25\left(\frac{\zeta r}{l}\right)^2} + 0{,}5\frac{\zeta r}{l}$; R — радиус кругового контура питания; b — расстояние до линейной границы ($R = 2b$); ζ — коэффициент ($\zeta = 1$ при фильтре у кровли пласта, $\zeta = 2$ при фильтре на расстоянии c от кровли, если $c > {}^1/_3 T$).

Таблица 5-2

Формулы для определения коэффициента фильтрации

Неустановившийся режим

Тип потока	Формулы[1]
Напорный ограниченной мощности	$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \left(\ln \frac{r}{r_0} + 0{,}5\Phi_0 \right) \ln \frac{S_0}{S}}{Tt}$ (5-19)
Безнапорный	$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \left(\ln \frac{r}{r_0} + 0{,}5\Phi_0 \right) \times \ln \frac{S_0 (H - 0{,}5S_0)}{S (H - 0{,}5S)}}{Ht}$ (5-20)
Напорный неограниченной мощности	$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \ln \frac{1{,}47t}{\zeta r_0}}{l_0 t} \ln \frac{S_0}{S}$ (5-21)
Безнапорный	$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0^2 \ln \frac{1{,}47l_0 - 0{,}5 (S_0 + S)}{\zeta r_0}}{[l_0 - 0{,}5 (S_0 + S)] t}$ (5-22)
Напорный [2]	$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0}{t} \ln \frac{S_0}{S}$ (5-23)

[1] Здесь r — расстояние наблюдательных скважин от центральной; S_0 и S — понижение в центральной скважине перед началом опыта ($t = 0$) и в момент t; l_0 — полная длина фильтра.

[2] Вода поступает через дно скважины.

Таблица 5-3

Значение функций Φ_0 (Φ_1, Φ_2)

$\frac{t}{T}$ \ $\frac{T}{r_0}$, 1, 2,	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,05	0,13	2,30	12,6	35,5	71,9	94,0	126,0	149,0	169,0
0,10	0,12	2,00	10,4	24,3	42,8	53,8	68,5	79,6	91,0
0,30	0,09	1,30	4,8	9,2	14,5	17,7	21,8	24,9	28,2
0,50	0,05	0,70	2,3	4,2	6,5	7,9	9,6	11,0	12,4
0,70	0,017	0,24	0,9	1,7	2,7	3,2	4,0	4,6	5,2
0,90	0,002	0,03	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1

размерах рабочей части скважины и при наличии сведений о расходах и понижениях уровня воды в скважине искомой величиной является коэффициент фильтрации (или водопроводимость пласта).

Сложнее обстоит дело, когда деформируемостью пласта и потока пренебречь нельзя. Тогда при тех же условиях проведения опыта, что и в указанном выше случае, кроме коэффициента фильтрации (водопроводимости), необходимо знать еще m' или a — коэффициенты, определяющие водоемкость грунта или упругие свойства горной породы и фильтрующейся жидкости, которые подробно рассматриваются в главе 6. Здесь заметим только, что изменения аккумулирующей способности пласта сказываются на величине фильтрационного сопротивления при фильтрации к скважине, которое в общем случае зависит от некоторого параметра $u=r^2/4at$, где $a=kh/m'$, т. е. $\Phi(u)$. Поскольку $\Phi(u)$ является величиной, зависимой от искомого коэффициента k, то для расчета по зависимости (2-39) приходится использовать метод последовательных приближений. Опыт показывает, что при малых значениях параметра u аналитическое выражение для фильтрационного сопротивления и сопротивления, обусловленного несовершенством скважины, упрощается. $\Phi(u)$ становится практически постоянной и может быть определена так же, как и в случае установившегося режима (табл. 5-3).

§ 5-3. Влияние граничных условий на расчет фильтрационных характеристик пласта

Выше при определении коэффициента фильтрации принимались лишь самые простые граничные условия, а именно: скважины с круговым контуром питания или с линейной границей с постоянным напором, например скважина у реки. В такой упрощенной постановке можно рассматривать только определенные задачи. Наряду с ними часто бывает необходимо решать задачи с гораздо более сложными граничными условиями. В таких случаях перед расчетом производят схематизацию с целью упрощения геометрических форм границ областей. При этом извилистые очертания берегов рек, бортов мало проницаемых пород, принимаемых за непроницаемые границы, и т. д., заменяют прямыми линиями. Классифицируя границы области фильтрации по геометрическому признаку, принято представлять эту область в виде плоскости, полуплоскости, полосы, многоугольника или круга. Замкнутые контуры внешних границ обычно приводят к круговому контуру, потому что, как показывают исследования, при достаточном удалении такого контура от центра скважины возможные отклонения его от круга на результатах расчетов сказываются мало [32]. Примеры различных случаев схематизации граничных условий приводятся в [25]. Кроме геометрических особенностей, следует установить условия питания

пласта на границах. При этом по [25] могут быть выделены граничные условия четырех видов, из которых наибольший практический интерес представляют случаи задания напора и расхода на границе l в виде

$$H_l = f(t) \quad \text{или} \quad H_l = \text{const}$$

и

$$Q_l = f(t) \quad \text{или} \quad Q_l = \text{const}.$$

Большое значение для расчетов имеет не только форма границ рассматриваемого пласта, определяющих его простирание в плане, но и характер залегания пласта в разрезе. Обычно различают пласты постоянной и переменной мощности. В период неустановившегося движения влияние границ сказывается по мере распространения возмущения потока от очага возмущения.

При фильтрации в безграничном пласте установившийся режим теоретически может наступить только при $t = \infty$. То обстоятельство, что на практике образование установившегося режима происходит в конечные промежутки времени, объясняется отличием реальных условий от идеальной схемы. Иначе обстоят дела при фильтрации в ограниченной области. Это легко иллюстрировать на примере. Пусть возмущение потока осуществлено с помощью одиночной совершенной скважины, и время, протекшее с начала возмущения потока, является достаточным для того, чтобы использовать при расчетах упрощенные уравнения неустановившегося режима фильтрации (так называемый квазиустановившийся режим). В этом случае справедлива зависимость (см. главу 6).

$$k = \frac{Q}{2\pi ST} \ln \frac{R_t}{r}, \tag{5-24}$$

где $R_t = 1{,}5\sqrt{at}$ — величина, зависящая от времени.

Следовательно, пока R_t остается меньше расстояния до границ пласта, влиянием этих границ можно пренебречь. При нарушении этого неравенства условия расчета изменяются. Наиболее простое решение получается в случае расположения скважины в полуограниченном пласте при условиях $H_l = \text{const}$ или $Q_l = 0$. Тогда с помощью метода зеркальных отображений в первом случае имеем уже приводившуюся в § 5-3 зависимость (5-1):

$$k = \frac{Q}{2\pi S_0 T} \ln \frac{2b}{r_0},$$

а во втором случае

$$k = \frac{Q}{2\pi S_0 T} \ln \frac{2{,}25at}{2br_0}. \tag{5-25}$$

Отсюда следует, что при наличии источника питания с постоянным напором при $R_t \geqslant b$ фильтрация практически установилась. В случае непроницаемого контура, как и в безграничном

пласте, теоретически установившийся режим фильтрации вообще не может быть достигнут.

При фильтрации к одиночной скважине в полосообразном пласте общий вид расчетной зависимости определяется условиями на контуре. Представив значение искомого коэффициента в виде

$$k = \frac{Q}{4\pi ST}\Phi_L, \tag{5-26}$$

можно определить соответствующие значения фильтрационного сопротивления Φ_L следующим образом. Полагая, что на обоих контурах полосы $H_l = \text{const}$, при определении понижения S в центральной скважине имеем

$$\Phi_L = 2\ln\frac{0{,}64L\sin\frac{\pi l}{L}}{r_0}, \tag{5-27}$$

где L — ширина полосы; l — расстояние скважины от ближайшей стороны. Если один контур непроницаем ($Q_l = 0$), а на другом $H_l = \text{const}$, то

$$\Phi_L = 2\ln\frac{1{,}27\operatorname{ctg}\frac{\pi l}{L}}{r_0}. \tag{5-28}$$

И, наконец, при обоих непроницаемых контурах ($Q_l = 0$)

$$\Phi_L = \frac{7{,}1\sqrt{at}}{L} + 2\ln\frac{0{,}16L}{r_0\sin\frac{\pi l}{L}}. \tag{5-29}$$

Определить граничные условия пласта в вертикальном разрезе труднее, чем в плане.

Разработке методики учета инфильтрации и испарения с поверхности депрессии посвящены многие работы [75, 93, 103].

Расчет фильтрации в пластах переменной мощности для одного частного случая проводился Хантушем [213, 34]. Многие исследователи изучали влияние на режим фильтрации различных условий питания пласта по площади контакта с другими слоями [212]. О результатах этих исследований несколько подробнее будет сказано в следующем параграфе. Здесь же можно отметить, что все полученные зависимости, представляя теоретический интерес, достаточно сложны и малоприемлемы для практических расчетов.

§ 5-4. Определение коэффициента фильтрации в случае неоднородной грунтовой толщи

Приведенные выше зависимости для определения коэффициента фильтрации получены для пластов, сложенных однородными изотропными грунтами. При распространении таких зави-

симостей на грунты с беспорядочной неоднородностью найденные значения коэффициента фильтрации являются по существу значениями, осредненными по рассматриваемому объему, что допустимо только при относительно невысокой неоднородности горных пород [188]. Вместе с тем в натурных условиях нередки случаи, когда для расчета фильтрационных характеристик пластов использование зависимостей, полученных в предположении однородного строения грунта, является недопустимой идеализацией. Тогда переходят к представлениям о грунтах с упорядоченной неоднородностью и о грунтах анизотропных. Примерами грунтов с упорядоченной неоднородностью могут служить слоистые пласты с кусочной неоднородностью в плане.

Методика расчета анизотропных пластов в условиях установившегося режима рассматривалась в работах многих авторов [6, 119, 200 и др.]. При этом для случая однородно-анизотропных пород исследовались вопросы плоской фильтрации и фильтрации осесимметричной. Разработаны аналитические и графические способы определения коэффициентов фильтрации и положения главных осей проницаемости при кустовых откачках (нагнетаниях) для заданных граничных условий. Возможность проведения таких наблюдений определяется наличием должного количества наблюдательных скважин.

В последние годы стали появляться также работы по методике использования данных о неустановившемся режиме фильтрации для оценки анизотропии пласта [168].

В основе всех аналитических зависимостей для определения искомых характеристик анизотропного пласта лежит преобразование координат с помощью коэффициента анизотропии

$$\lambda = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}, \qquad (5\text{-}30)$$

где k_x и k_y — значения коэффициента фильтрации вдоль координатных осей x и y.

В деформированной области, где пласт преобразуется в однородный, координаты определяются как $x = \lambda x_1$, $y = y_1$.

Изучение анизотропных свойств пласта в натурных условиях представляет существенные трудности, но в благоприятных условиях может быть осуществлено по данным о различных способах опробования пласта при помощи опытов с индикаторами или путем отбора кернов. Можно, например, оценить анизотропию пласта путем сопоставления результатов испытания несовершенных скважин, работающих дном, с результатами испытания совершенных скважин и т. д.

Способы исследования анизотропных свойств грунтов могут быть распространены и на слоистые грунты при условии мелкой слоистости. При наличии слоев значительной мощности методика расчета изменяется.

Расчет фильтрационных потоков при гидравлически связанных горизонтах не раз привлекал внимание исследователей, поскольку постановка и решение таких задач имеет большое практическое значение. Ввиду сложности вопроса общее решение получить пока не удается. Изучению были подвергнуты только два предельных случая схематизации совместной работы водоносных горизонтов в слоистых грунтах. Один из них имеет место, когда в пределах каждого слоя горизонтальные составляющие по высоте не изменяются. Второй случай предполагает возможность представления фильтрационного потока в одном слое как горизонтально направленного, а в другом — слабопроницаемом — как вертикально направленного.

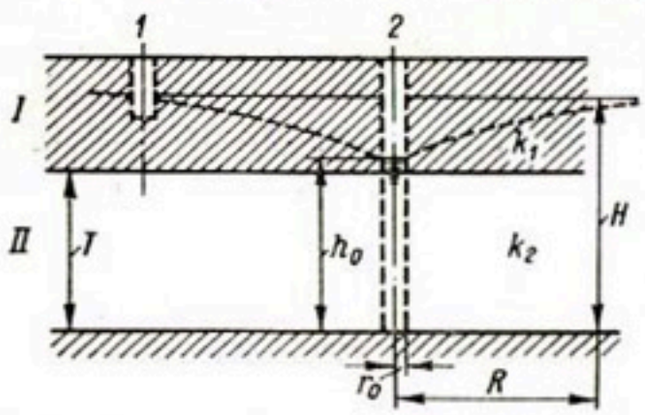


Рис. 5-1. Опытный створ при определении коэффициентов фильтрации двухслойного пласта.

Первый случай рассматривался в работах К. И. Добровольского [54], П. Я. Полубариновой-Кочиной [129], И. Ф. Бурлая [26] и др. На этом же принципе основан и способ определения напоров пьезометров, контролирующих гидравлически связанные пласты, рассмотренный в работе Д. Сокола [230].

В настоящее время для определения значений коэффициента фильтрации отдельных слоев многослойного пласта известно несколько способов. Наиболее простое и грубое решение дает так называемый способ послойных определений коэффициента фильтрации. При этом способе в пределах каждого изучаемого слоя оборудуется фильтр скважины. Скважину желательно делать несовершенной, причем приемник ее должен быть равно удален от подошвы и кровли изучаемого пласта. Определение коэффициента фильтрации по расходу такой скважины проводится в предположении, что испытуемый пласт изолирован. Разновидностью способа послойных определений коэффициента фильтрации можно считать способы К. И. Добровольского [54]. Один из них применяется для двухслойного пласта со слоями большой мощности при условии, что дебит скважины, совершенной в пределах одного слоя, в основном определяется фильтрационными характеристиками этого слоя. Тогда по данным о дебите совершенной скважины в верхней части пласта можно определить коэффициент фильтрации первого слоя. Соответственно совершенная скважина, оборудованная в нижней части пласта, может быть использована для определения коэффициента фильтрации второго слоя.

Очевидно, что рассмотренный способ можно использовать только для определения рекогносцировочных значений коэффи-

циентов фильтрации. Несколько точнее другой способ К. И. Добровольского. Этот способ применим для двухслойной среды небольшой мощности с резко отличными значениями коэффициентов фильтрации. При наличии высокой проницаемости верхней части пласта *I* соответствующий коэффициент фильтрации k_1 определяется путем откачки из скважины *1*, расположенной в верхнем слое (рис. 5-1). Затем проводят откачку из совершенной скважины в нижнем слое и определяют коэффициент фильтрации слоя *II* по формуле:

$$k_2 = Q\frac{\ln\frac{R}{r}}{2\pi(H-h_0)T} - k_1\left(\frac{H+h_0}{2T}-1\right), \qquad (5\text{-}31)$$

где T — мощность *II* слоя; H — напор на расстоянии R; h_0 — напор в скважине радиусом r_0.

В случае, когда верхний слой подстилается более проницаемым, рекомендуется проводить откачку так, чтобы удовлетворялось условие:

$$\frac{H+h_0}{2T} \approx 1,$$

тогда

$$k_2 \approx \frac{Q\ln\frac{R}{r}}{2\pi(H-h_0)T}. \qquad (5\text{-}32)$$

Последний случай возможен только при определенном соотношении T и H, именно при $T \geqslant 0{,}75\,H$.

И. Ф. Бурлай [26] разработал целую серию способов по определению значений коэффициентов фильтрации различных слоев («частная водопроницаемость» по терминологии автора). Все эти способы основаны на интерпретации результатов многократных откачек или на результатах определения дебитов центральной работающей скважины, дифференцированных по ее высоте и по периметру, а также на совместном использовании всех этих способов. Таким образом, исследователь может непосредственно определить коэффициент фильтрации грунта исследуемого участка по данным о дебите и падении напора. Эти же коэффициенты фильтрации могут быть получены косвенным путем по данным о расходах при различных размерах области изучаемого потока.

В целом ряде случаев представляют интерес осредненные фильтрационные характеристики грунтов. Тогда при определении коэффициента фильтрации грунта по направлению вдоль слоев можно применить выражение:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i T_i}{T_{\text{общ}}} \qquad (5\text{-}33)$$

и для коэффициента фильтрации поперек напластования

$$k = \frac{T_{\text{общ}}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{T_i}{k_i}}, \tag{5-34}$$

где n — число параллельных слоев толщиной T_i с коэффициентом фильтрации k_i; $T_{\text{общ}}$ — суммарная толщина всех слоев. Более точный учет слоистого строения пласта дает потенциал Гиринского [11]

$$\varphi = \int_0^h k(z)(h - z)\,dz, \tag{5-35}$$

где z — высотная координата.

Определению коэффициента фильтрации двухслойных пластов разной проницаемости при условии, что верхний слой имеет более низкий коэффициент фильтрации, посвящены работы Н. К. Гиринского [25] и В. М. Григорьева [48]. Оба автора принимают, что в верхнем пласте движение происходит только по вертикали. Отличие указанных способов состоит в том, что В. М. Григорьев рассматривает безнапорный поток в верхнем пласте с учетом капиллярной каймы на его поверхности, а Н. К. Гиринский ограничивается случаем затопленного пласта. Случаи фильтрации в предположении только вертикального движения в верхнем пласте были рассмотрены также и другими исследователями [25].

§ 5-5. Определение коэффициента фильтрации по данным групповых откачек

При изучении фильтрационных свойств грунтовых массивов большой протяженностью практический интерес представляют не только местные значения коэффициента фильтрации, но и осредненные показатели, характеризующие массив в целом. Получение соответствующей информации непосредственно из опыта возможно лишь при наличии достаточно широкого фронта возмущения потока.[1]

Подобные условия могут быть созданы при проведении работ по водопонижению или водонасыщению исследуемого участка, а при благоприятных обстоятельствах также и в условиях естественного потока [94].

Расчет фильтрации в таких случаях обычно проводится экспериментальным путем, большей частью с помощью метода

[1] Заметим, что здесь идет речь об определении осредненных характеристик непосредственно из опыта, а не путем расчета по данным точечных замеров (например, расчет по способу Столмана и др.).

ЭГДА (§ 5-6). Что же касается аналитических методов расчета, то возможности определения коэффициента фильтрации с помощью расчетных зависимостей, полученных для отдельных частных случаев установившейся фильтрации, представляются сравнительно редко и не являются типичными для фильтрационных исследований гидротехнических сооружений. Подобные вопросы достаточно полно рассматриваются в монографиях, посвященных методике фильтрационного расчета в стадии проектирования [12, 30, 57, 102, 121, 144].

Для целей нашего исследования наибольший интерес представляют случаи водопонижения с помощью систем скважин, использование которых в данных условиях представляет собой доступную форму опробования пластов для определения их фильтрационных характеристик. При расчете систем близко расположенных скважин приходится рассматривать условия их взаимодействия.

При расчете взаимодействующих скважин обычно используется принцип сложения течений [11, 30] (см. § 2-8). При этом понижение напора в любой заданной точке пласта может быть определено как результат действия всех рассматриваемых скважин в виде

$$S_M = \sum_{i=1}^{n} S_{iM} = \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{4\pi kT} \Phi_i, \qquad (5\text{-}36)$$

где S_i — понижение в любой точке M от действия i-й скважины; Q_i — расход i-й скважины; Φ_i — ее фильтрационное сопротивление.

С помощью такой зависимости при различных значениях Φ_i, определяемых по соответствующим формулам для одиночных скважин при заданных Q_i, можно найти искомое значение коэффициента фильтрации.

Такой подход к расчету k, строго говоря, справедлив только в случае однородного грунта. Кроме того, в случае пласта, ограниченного в плане, для учета особенностей граничных условий необходимо еще производить зеркальные отображения исследуемых скважин.

Более удобен для практических целей способ расчета взаимодействующих скважин, основанный на использовании, кроме принципа сложения течений, еще и метода фрагментов. При этом системы скважин приводят к так называмым обобщенным системам, т. е. к крупным выработкам достаточно простой формы, например к замене отдельных групп скважин эквивалентными траншеями с равномерным притоком по длине.

Замена систем скважин обобщенной системой производится из того условия, что расход обобщенной системы и поле фильтрационного потока на некотором расстоянии от нее за пределами зоны резкой деформации потока, точно такие же, как

расход и поле потока соответствующей системы заменяемых скважин, т. е.

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i, \tag{5-37}$$

где Q_i — расход отдельных скважин.

Переход от понижения напора в обобщенной системе к напору в отдельных скважинах осуществляется по выражению

$$S_{\text{скв}} = S_{\text{об}} + \Delta S_{\text{скв}}, \tag{5-38}$$

а соответствующее фильтрационное сопротивление будет

$$\Phi_{\text{скв}} = \Phi_{\text{об}} + \Delta\Phi_{\text{скв}}, \tag{5-39}$$

где $\Phi_{\text{об}}$ — фильтрационное сопротивление обобщенной системы, так называемое внешнее сопротивление, определяемое размерами этой системы, граничными условиями и фильтрационными свойствами пласта. Соответственно внутреннее сопротивление системы $\Delta\Phi_{\text{скв}}$ определяется видом и условиями размещения скважин группы.

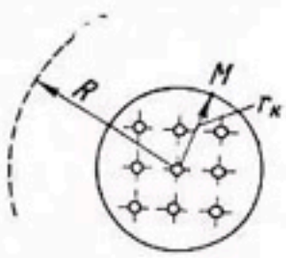


Рис. 5-2. Схема к расчету по способу большого колодца.

Сопротивление $\Delta\Phi_{\text{скв}}$ можно определить по [23] в виде

$$\Delta\Phi_{\text{скв}} = \ln\frac{r_n}{r_0} + \Phi, \tag{5-40}$$

где r_n — приведенный радиус условной области влияния скважины внутри системы:

$$r_n \approx \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\pi}, \tag{5-41}$$

σ_1 и σ_2 — средние расстояния между соседними скважинами; Φ — фильтрационное сопротивление несовершенной скважины, определяемое в соответствии с § 5-3.

При ориентировочном определении коэффициента фильтрации можно использовать формулу притока к одиночному колодцу (метод большого колодца). При этом все действующие скважины приводятся к некоторому фиктивному одиночному колодцу, расчет которого производится по зависимости

$$S_M = \frac{\sum Q_i}{2\pi kT}\ln\frac{R}{r_к}, \tag{5-42}$$

где S_M — расчетное понижение на контуре фиктивного колодца, определяемое по (5-36); $r_к$ — расстояние от центра группы до точки M на контуре фиктивного колодца (рис. 5-2), причем $r_к$ не должно быть меньше максимального расстояния между крайними скважинами; ΣQ_i — суммарный расход скважин; R — радиус контура питания.

Кроме рассмотренного случая большого колодца, из литературы [25, 102] известно еще несколько частных решений, полученных для простейших расчетных случаев с помощью указанных способов и способа зеркальных отображений.

При более сложных условиях задачи, когда контур обобщенной системы представлен фигурой произвольной формы (например, полигональный контур) и имеются достаточно сложные граничные условия, для расчета фильтрационных характеристик грунта могут быть использованы сетки фильтрации и результаты опытов по методу ЭГДА.

С этой целью площадь изучаемого массива разбивается системой взаимно пересекающихся линий тока и линий равного потенциала H на отдельные ячейки, причем, как известно, эти линии должны быть ортогональны. Построение такой сетки ведется путем последовательных приближений. Затем определение коэффициента фильтрации может производиться дифференцировано по отдельным лентам тока с помощью уравнения Дюпюи:

$$q = kT \frac{\Delta H}{\Delta l} \Delta s, \tag{5-43}$$

где ΔH — потеря напора в ячейке; Δl — длина ячейки; Δs — ширина ячейки.

§ 5-6. Применение метода ЭГДА для определения фильтрационных характеристик пластов

При определении коэффициента фильтрации пласта, например при помощи откачек из одиночной скважины, пользуемся следующей общей формулой:

$$\frac{Q}{k} = \frac{S}{\Phi}, \tag{5-44}$$

где S — величина понижения и Φ — фильтрационное сопротивление, зависящее от формы грунтового потока и обратно пропорциональное длине водоприемника. В ряде простейших случаев функция Φ будет известной из теоретических решений. Но если имеется область фильтрации сложной формы и при этом скважина будет несовершенной, то теоретическое определение Φ либо весьма сложно, либо вообще не может быть получено. В таких случаях на помощь приходят экспериментальные методы и в первую очередь метод ЭГДА.

Положим, что имеется некоторая область напорной фильтрации в пласте сложной формы в плане и разрезе. В пласте заложена скважина, из которой производится откачка воды.

Положим далее, что из электропроводного материала изготовлена пространственная модель пласта в линейном масштабе α_l, геометрически подобная форме пласта.

Из известных формул вытекает, что фильтрационное сопротивление пласта выражается через электрическое сопротивление модели $R_м$ следующим образом:

$$\Phi = \frac{R_м}{\rho \alpha_l}, \tag{5-45}$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление модели; α_l — линейный масштаб модели. Следовательно, коэффициент фильтрации исследуемого однородного пласта

$$k = \frac{Q}{H}\Phi = \frac{QR_м}{\alpha_l \rho H}, \tag{5-46}$$

где H — разность напоров на питающем скважину контуре и в самой скважине. Величины Q и H известны из натурных наблюдений, остальные величины в (5-46) получаются из опыта на модели.

Понятно, что описанный метод можно применить при откачке из системы скважин, галерей и т. д. Тот же метод можно применять и при фильтрации в безнапорном пласте, на чем мы здесь не будем останавливаться.

Теперь рассмотрим еще одну практически интересную задачу натурных исследований водопроводимости пласта, решаемую с применением метода ЭГДА.

Плановая установившаяся фильтрация в условиях слоистых пластов, при криволинейном водоупоре и при отсутствии инфильтрации удовлетворяет уравнению (2-30), если положить в нем $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$, т. е.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(H_k \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(H_k \frac{\partial h}{\partial y}\right) = 0, \tag{5-47}$$

где H_k — водопроводимость пласта, определяемая по формуле (2-14).

По способу В. И. Аравина [9] такая фильтрация может быть исследована при помощи метода ЭГДА или на электроинтеграторе путем замены безнапорного грунтового потока напорным и приведения пласта с переменным коэффициентом фильтрации к однородному пласту, мощность которого изменяется пропорционально водопроводимости водоносного пласта на каждой вертикали.

Обычно задача исследования фильтрации по указанному способу заключается в определении свободной поверхности планового потока и фильтрационного расхода по заданным граничным условиям и при известных величинах водопроводимости во всей области фильтрации. Однако при натурных исследованиях фильтрации возникает и обратная задача: по данной свободной поверхности потока и при заданных граничных условиях требуется

определить водопроводимость безнапорного пласта в данной области фильтрации. В результате решения такой задачи должны быть построены изолинии $H_k = \text{const}$ на чертеже плана области фильтрации.

Экспериментальное решение задачи определения H_k, таким образом, основывается на данных натурных наблюдений за свободной поверхностью грунтового потока. Практически задача сводится к экспериментальному подбору глубин электролитической модели таким образом, чтобы в каждой точке на свободной поверхности удовлетворялось условие:

$$h = z + H, \qquad (5\text{-}48)$$

где h — известный на основании карты гидроизогипс напор; z — координаты точек поверхности водоупора и H — глубины грунтового потока (рис. 5-3, *а*).

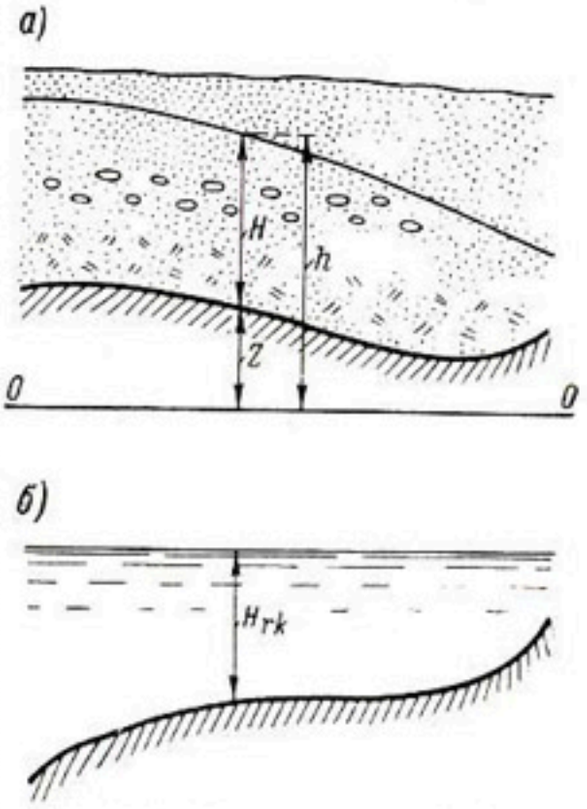


Рис. 5-3. Схема плановой фильтрации и ее модели.

Эта задача технически сложнее, чем задача об определении свободной поверхности, так как обычно при ее решении неизвестны коэффициенты фильтрации слоев, слагающих пласты, и конфигурация дна модели определяется на основании сведений о соотношениях расходов в местах выхода грунтового потока.

Для облегчения задачи предварительного задания поверхности дна модели полезно провести опыты на плоских моделях вертикальных разрезов пласта по линиям тока.

Задание поверхности дна модели представляет некоторую неопределенность, так как можно получить множество решений, задаваясь поверхностью дна на разных отметках. Положим, что мы задались формой поверхности дна и путем постепенных приближений, изменяя эту форму в процессе опыта, получили поверхность дна, при которой в каждой точке свободной поверхности с достаточной точностью удовлетворяется условие (5-48). Для определения масштаба можно использовать два способа.

Первый способ заключается в том, что в некоторой точке плана области фильтрации производится определение H_k по известным значениям коэффициентов фильтрации слоев и по их мощностям из формулы (2-14) или другими способами, например по способу, изложенному в § 6-7.

Имея водопроводимость пласта H_k в данной точке и глубину электролита H_{pk} в соответствующей точке модели (рис. 5-3, *б*), определяем масштаб H_k:

$$k_0 = \frac{H_k}{H_{rk}}. \tag{5-49}$$

Таким образом, для определения H_k в любой точке области фильтрации следует умножить глубину модели в этой точке на k_0.

Второй способ определения масштаба H_k заключается в следующем. Определяем тем или иным способом фильтрационный расход Q в натуре, а из опытов находим электрическое сопротивление модели $R_м$. Тогда на основании известной формулы [11] определяется k_0:

$$k_0 = \frac{QR_м}{\alpha_l \rho H}, \tag{5-50}$$

где α_l — линейный масштаб модели; ρ — удельное сопротивление материала модели; H — действующий напор.

Определение H_k на электрической модели осложняется наличием дренажных устройств. В таких случаях полезно разбить исследование по методу ЭГДА на этапы.

В первом этапе производятся опыты по определению формы дна модели[1] при отсутствии дренажных устройств. При этом на тех участках модели, где должны быть расположены дренажные устройства, напоры на модели (электрические потенциалы) должны быть выше тех, которые имеются в натуре, что удобно при проведении дальнейших опытов.

Во втором этапе проводятся такие же опыты, но с присоединением части дрен на участке, где глубины модели подбираются уже с возможной точностью.

В третьем этапе проводятся те же опыты, но с присоединением еще части дрен и т. д.

Подобным путем постепенно получается форма дна модели. Об определении масштаба H_k было сказано выше. Такое исследование было проведено О. Н. Носовой для левого берега Братского гидроузла со стороны нижнего бьефа, где требовалось дать прогноз подтопления площадки ОРУ при дальнейшем наполнении водохранилища и оценку работы дренажных устройств.

§ 5-7. Определение коэффициента фильтрации пласта по дебитам пьезометров

При проведении исследований фильтрационного режима в гидротехнических сооружениях практически наиболее простым и доступным способом определения фильтрационных характе-

[1] Дно модели устраивается из парафина и в процессе опытов обрабатывается до нужной глубины.

ристик пласта является использование результатов наблюдений за дебитами пьезометров в процессе их откачек или нагнетаний. По сведениям об этих дебитах можно получить самую широкую информацию о водопроницаемости водоносного пласта, и потому правильное решение вопросов рациональной обработки результатов этих исследований имеет большое практическое значение.

Пьезометры по своему прямому назначению должны служить для определения пьзометрического напора фильтрационного потока. Тем не менее, в практике фильтрационных исследований пьезометры часто используются и для определения фильтрационных характеристик грунта в месте заложения пьезометра путем откачек или нагнетаний. Такой способ изучения пласта, за

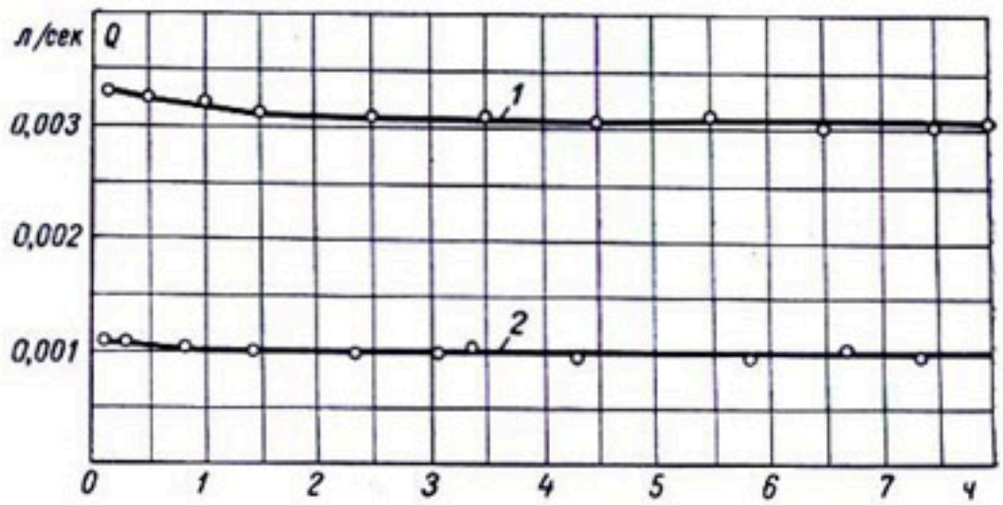


Рис. 5-4. Установление фильтрационного расхода пьезометров *1* и *2* при заданной величине понижения.

исключением особо неблагоприятных условий, вполне рационален. В настоящее время определения дебитов пьезометров предусматриваются в качестве обязательных в инструкциях по контролю за режимом работы сооружений на многих крупных гидроузлах.

Определения дебитов напорных пьезометров при их откачке обычно проводятся один или два раза в год. По техническим причинам определение дебита обычно бывает непродолжительным, и потому часто откачка пьезометров происходит в режиме неустановившегося движения. Впрочем, опыт показывает, что нередки случаи, когда даже за такой короткий срок режим фильтрации приобретает установившийся характер. Это относится к случаям расположения пьезометров в напорных горизонтах, обладающих достаточно высокой водопроницаемостью. В качестве примера на рис. 5-4 приведены результаты опробования пьезометров верхне-соликамского горизонта основания водосливной плотины Камской ГЭС. Опыты по определению дебита при постоянном понижении напора проводились 8—9 *ч*. За это время общее изменение дебита по сравнению с измеренным

сразу после открытия вентиля составило только 10—15%. Заметим, что подобные примеры не единичны [1].

К выбору методики определения коэффициента фильтрации по данным о дебитах пьезометров надо подходить дифференцированно. В тех случаях, когда стабилизация значений дебита происходит быстро, можно применять для расчетов уравнения установившейся фильтрации.

Теоретически расчет коэффициентов фильтрации по данным о дебитах пьезометров ничем не должен отличаться от подобных расчетов по результатам испытаний одиночных скважин. Тем не менее вследствие некоторых особенностей основного назначения пьезометров и их конструкции расчеты фильтрационных характеристик грунта по данным об испытании пьезометров имеют известную специфику. К таким особенностям относится необходимость соблюдения мер предосторожности для уменьшения искажения фильтрационного потока во время определения дебита. В результате этого, а также из-за малых размеров водоприемника пьезометров область возмущений потока, вызванных отбором воды во время откачки пьезометра или нагнетания, оказывается малой по сравнению с общими размерами изучаемого массива, и соответственно результаты наблюдений, проводимых во время такого опыта, позволяют оценить только локальные значения коэффициента фильтрации. В то же время по техническим причинам на практике часто отсутствуют точные сведения об устройстве и состоянии фильтра пьезометра, а данные об условиях залегания пласта имеют столь укрупненный характер, что иногда бывают не применимыми для определенной конкретной области. К тому же отсутствие должного количества наблюдательных точек, достаточно близко расположенных друг от друга, заставляет использовать расчетные зависимости, основанные на показаниях только одной центральной скважины, и не дает возможности оценить потери напора на фильтре пьезометра, хотя эти потери могут быть весьма существенны.[2]

Из сказанного вытекает, что надежность определений коэффициентов фильтрации по результатам испытаний пьезометров не очень велика, а если принять во внимание и локальный характер опытных данных, то можно признать, что в таких условиях допустимо использовать приближенные расчетные зависимости. По результатам таких опытов обычно бывает достаточно определить только порядок величины искомого коэффициента.

Заметим, что точность определений фильтрационных характеристик пласта по данным даже крупных откачек тоже яв-

---

[1] Так, например, Мансур [222] наблюдал относительную стабилизацию движения в опытах со скважинами в натурных условиях — через 15—30 *мин* и полную стабилизацию — через 2 *ч* после начала откачки.

[2] Заметим, что во всех случаях, где имеются должным образом оборудованные кусты скважин, расчет коэффициента фильтрации следует проводить по показаниям наблюдательных скважин.

ляется невысокой, так как при этом определяются некоторые средние значения искомых характеристик. В связи с этим вызывают недоумение расчетные зависимости некоторых авторов, в которые вводятся числовые коэффициенты, вычисленные с точностью до третьего, а иногда и до четвертого знака. Подобные выражения для этих коэффициентов создают ложное впечатление о точности проводимых расчетов. Очевидно, для определения фильтрационных характеристик грунта достаточно иметь значения числовых коэффициентов с двумя знаками.

Возвращаясь к расчету коэффициентов фильтрации в свете сделанных выше замечаний, можно отметить, что из большого количества расчетных зависимостей, используемых в расчетной практике, целесообразно выделить наиболее удобные. В этих зависимостях достаточная простота должна сочетаться с необходимой точностью. При прочих равных условиях предпочтение должно быть отдано формулам, содержащим меньшее число параметров, для определения которых требуется знание геологии пласта и устройства рабочей части приемника пьезометра.

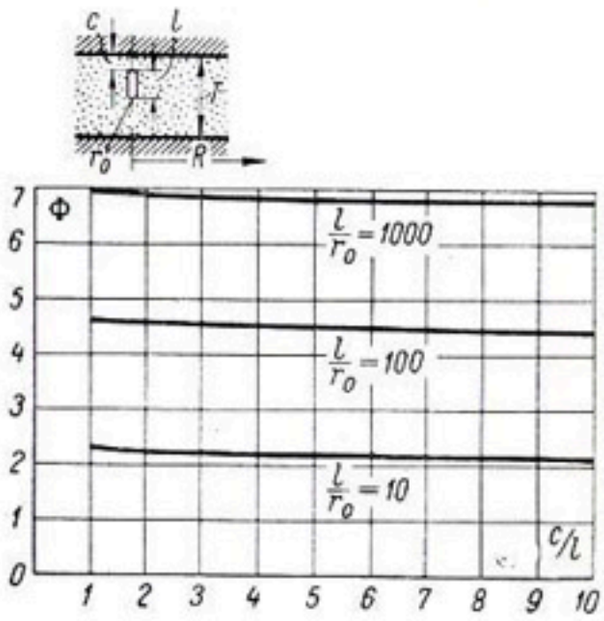


Рис. 5-5. Зависимость фильтрационного сопротивления несовершенных скважин от отношения c/l.

Для выбора оптимальных расчетных зависимостей, учитывающих специфику опытов с пьезометрами, необходимо провести сравнительные расчеты и определить значения погрешностей, вносимых в расчеты. Значительная работа в этом направлении проделана С. К. Абрамовым и В. Д. Бабушкиным [1]. Ими проверены и выявлены пределы применимости многих известных расчетных зависимостей, что дает возможность более обоснованно производить необходимые расчеты. Тем не менее, для расчетов по данным испытаний пьезометров могут быть сделаны дополнительные упрощения.

Некоторые предварительные исследования в этом отношении были выполнены О. Н. Носовой. Так, например, было установлено, что во всех случаях расчета по схеме несовершенной скважины влиянием расстояния фильтра от кровли водоупора c (рис. 5-5) можно пренебречь и считать фильтр примыкающим непосредственно к кровле. Для иллюстрации этого положения на рис. 5-5 и 5-6 приведены графики зависимости величины фильтрационного сопротивления Ф от отношения c/l и c/T при разных значениях l/r_0, рассчитанные по зависимости, приведенной в [105].

Из этих графиков видно, что влияние отношений c/l и c/T на результаты вычислений практически невелико. Такие же выводы можно сделать и на основании данных, приведенных в [25], где расчеты проводились по более точным зависимостям. Во всяком случае, при наиболее невыгодных обстоятельствах, в случае пласта ограниченной мощности, ошибка расчета, обусловленная огрублением расчетной схемы, не превышает 50%, что при опытах с пьезометрами вполне допустимо, причем указанная погрешность уменьшается при увеличении отношения l/r_0. Это условие выдерживается при значениях отношения $l/r_0 \geqslant 10$, что обычно

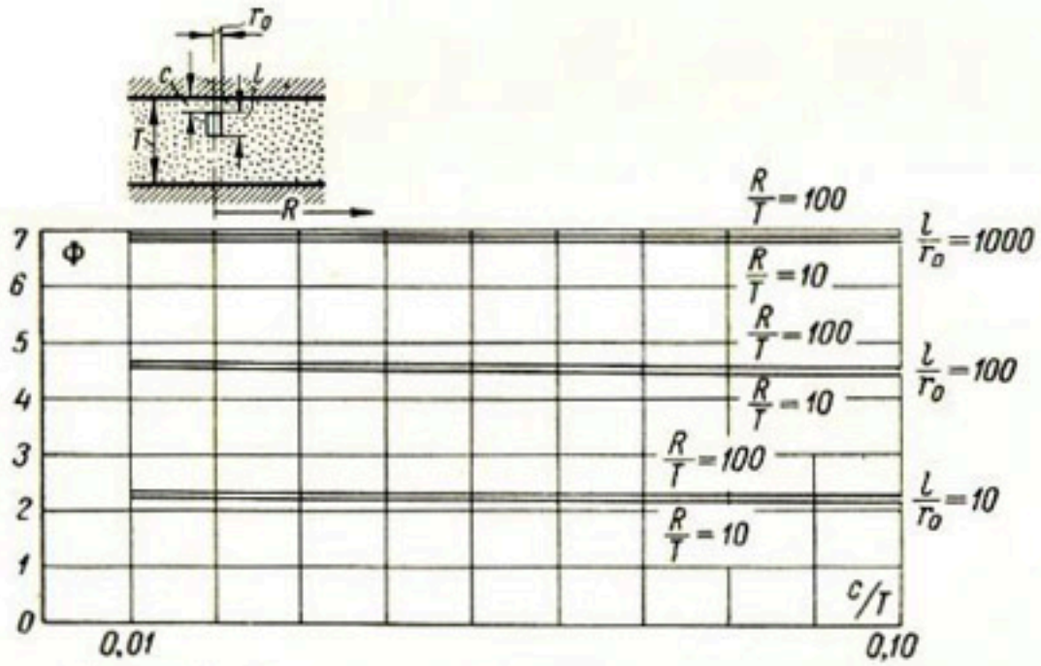


Рис. 5-6. Зависимость фильтрационного сопротивления несовершенных скважин от c/T.

выполняется для пьезометров. В условиях пласта неограниченной мощности при наиболее невыгодном случае, когда расчеты проводятся по данным наблюдательных скважин при $l/r_0 \ll 10$, ошибиться в определении величины коэффициента фильтрации в результате пренебрежения величиной c можно только в 2 раза.

§ 5-8. Определение коэффициента фильтрации по нагнетаниям в неводонасыщенный грунт

Определение коэффициента фильтрации неводонасыщенных пород часто представляет большой практический интерес, так как только при наличии правильной количественной оценки водопроницаемости пласта представляется возможность обоснованного прогноза подпора грунтовых вод при подтоплении. Для определения коэффициента фильтрации в указанных условиях получили распространение разнообразные способы, основанные на наблюдениях за результатами опытных нагнетаний и наливов в одиночные горные выработки (скважины, шурфы).

Различие между нагнетанием и наливом довольно условно. Некоторые авторы [32] предлагают относить к нагнетаниям случаи ввода воды в пласт под напором, превышающим отметку устья скважины.

Соответственно наливом называются случаи водонасыщения горных пород при уровне воды в скважине ниже ее устья.

Методика расчета искомых характеристик пласта, определяемых по результатам наблюдений за нагнетаниями и наливами, зависит от вида выработки, через которую осуществляется подача воды в пласт, и от режима этой подачи.

Сложность расчета фильтрационных характеристик неводоносных пород состоит в том, что такой расчет требует учета целого ряда трудноопределимых факторов: размеров зоны растекания потока, пористости, влияния сил упругости, тяжести, влияния анизотропии грунта и др. В результате для расчета приходится пользоваться упрощенной схемой.

Существует большое количество различных способов расчета, получивших уже то или иное применение в практике натурных исследований фильтрации. Из ряда существующих способов расчета фильтрационных характеристик грунта по данным о водонасыщении, подробно излагаемых в некоторых монографиях, статьях и справочниках [25, 32, 161 и др.], отметим только наиболее типичные.

Среди применяемых в настоящее время способов опытного водонасыщения пород можно выделить способы, предназначенные для определения коэффициента фильтрации пород в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Примером определения водопроницаемости грунта при фильтрации в горизонтальном направлении может служить нагнетание воды с постоянным дебитом в одиночную совершенную скважину. Пренебрегая силами тяжести, капиллярного давления, упругости воды и пористой среды и сопротивления воздуха, получаем зависимость [32]:

$$k = 0{,}183 \frac{Q \lg \frac{t_2}{t_1}}{(s_2 - s_1)\, l}, \qquad (5\text{-}51)$$

где s_1 и s_2 — напоры воды над верхней границей опытного интервала испытуемой скважины в моменты времени t_1 и t_2; l — длина испытуемого интервала. При этом пористость (точнее говоря, коэффициент водопоглощения) грунта можно оценить по зависимости:

$$m = \frac{Q t_1}{\pi l r_0^2} \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{\alpha}, \qquad (5\text{-}52)$$

где

$$\alpha = \frac{s_1 + 0{,}5l}{s_2 - s_1}.$$

Несколько более сложные зависимости получаются при определении тех же параметров в случае нагнетания с постоянным напором, причем расчет характеристик пласта по данным нагнетаний является трудоемким. Определение фильтрационных характеристик грунта по данным нагнетаний в пласты неограниченной мощности представляет еще большие трудности, чем в случае нагнетания в совершенные скважины.

С расчетом коэффициентов фильтрации в подобных условиях можно познакомиться в специальных монографиях, например в [32].

Расчет значений коэффициентов фильтрации по результатам наливов в скважины не имеет принципиальных отличий от соответствующих расчетов по данным о нагнетаниях. Исключение представляют только те случаи налива, когда уровень воды в испытуемой скважине оказывается в пределах опытного интервала. В таких условиях в зависимости от степени изотропности грунта обычно используются два варианта расчетов в упрощенной постановке. Один из них, основанный на гипотезе Дюпюи — Буссинеска, применяется при наливах с постоянным расходом в изотропные породы. Второй используется при испытаниях анизотропных пород, малопроницаемых в вертикальном направлении, причем налив проводится при постоянном напоре.

Оба варианта названных расчетов применимы только в опытах с совершенными скважинами при условии, что влиянием капиллярности можно пренебречь. Для облегчения расчета по зависимостям, полученным со всеми отмеченными выше упрощениями, в соответствующих работах приводятся расчетные графики [25, 32].

Примером определения фильтрационных характеристик пласта в вертикальном направлении могут служить исследования, осуществляемые по данным наливов в шурфы. В основе этих способов лежит метод Болдырева — Нестерова [25, 161]. Согласно этому методу, на выделяемом участке смачиваемой зоны грунта создается вертикальный одномерный поток. Питание такого потока осуществляется по заданному режиму: с постоянным расходом или с постоянным напором. Технически выделение контролируемой составляющей потока чаще всего проводится с помощью соосных цилиндрических колец, устанавливаемых на дне опытного шурфа. При этом предполагается, что вода, поступающая в зазор между наружным и внутренним кольцом, обеспечивает питание всей зоны пространственной фильтрации (зоны растекания), а вода, поступающая во внутреннее кольцо, идет только на создание одномерного потока. Во время опыта в фиксированные моменты времени регулярно измеряются уровень воды в шурфе и объем впитавшейся воды, а после опыта определяется глубина промачивания. При постоянном расходе и при условии, что время опыта $t_{к0} \geqslant 20\ h_к/q$, где $h_к$ — высота

капиллярного поднятия в грунте, а q — расход на единицу площади, имеем [32]:

$$k = \frac{(q-u)^2}{(1-m)(q-u)+qm}, \quad m = \frac{qt_{к0} - h_{к0}}{l}, \tag{5-53}$$

где $h_{к0}$ — глубина воды в шурфе в конце опыта; l — глубина промачивания; u — скорость подъема уровня воды в шурфе в момент $t_{к0}$. При $u=0$ получаем формулу Болдырева.

Рассмотренный способ определения коэффициента фильтрации рекомендуется для грунтов с малым значением $h_к$.

Техника расчета искомых характеристик грунта при опытах с постоянным напором несколько сложнее и требует использования метода последовательных приближений. Подробности этой методики приведены в [32].

Одной из модификаций метода Болдырева — Нестерова является способ, предложенный Н. Н. Биндеманом [25]. В основе этого способа лежит использование уравнения неустановившейся фильтрации. Во время опыта проводятся наблюдения за понижением уровня воды, налитой в шурф перед началом опыта. По окончании опыта определяется величина промачивания. При этом расчет величины коэффициента фильтрации проводится по зависимости

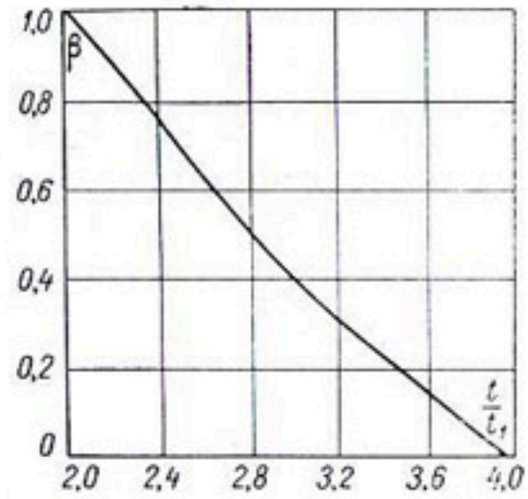


Рис. 5-7. Кривая к расчету коэффициента фильтрации по способу Н. Н. Биндемана.

$$k = \frac{\beta V}{\omega t}, \tag{5-54}$$

где V — общий объем впитавшейся воды; ω — площадь центрального кольца; t — продолжительность опыта.

Величина коэффициента β определяется в зависимости от отношения t/t_1 по кривой на рис. 5-7, причем t_1 — время, в течение которого впитывается половина объема воды, предназначенного для проведения всего опыта.

В заключение отметим еще способ определения фильтрационных характеристик грунта по данным наблюдений за водонасыщением, предложенный Н. К. Гиринским [25]. Им было получено точное гидромеханическое решение плоской задачи растекания воды из канала, огражденного вертикальными стенками. Путем сопоставления сеток движения, построенных для этого случая и для случая фильтрации из шурфа круглого поперечного сечения, получены соответствующие расчетные зависимости:

$$k = \zeta Q\alpha \ [м/сут], \tag{5-55}$$

где Q — установившийся расход, *л/мин*; ζ — размерный коэффициент, зависящий от глубины воды в шурфе h_0 и от $h_к$ и от d — диаметра направляющего цилиндра; α — поправочный коэффициент.

Опыт проводится путем налива воды в металлический цилиндр диаметром d, вдавленный в дно шурфа на несколько сантиметров. Во время опыта должен быть создан режим установившейся фильтрации из шурфа.

Значение коэффициента ζ изменяется от 0,6 до 7,0 и при $h_0+h_к=1$ *м*; $d=30$ *см*; $\zeta=1{,}0$.

Значение коэффициента α определяется в зависимости от диаметра цилиндра и глубины вдавливания цилиндра в грунт s по формуле:

$$\alpha = 1 + 2\frac{s}{d}. \qquad (5\text{-}56)$$

§ 5-9. Сравнительная оценка практической применимости различных способов определения коэффициента фильтрации по опытам со скважинами

Многообразие способов натурного определения коэффициентов фильтрации грунта и расчетных схем, с помощью которых проводится расчет, зачастую создает затруднения при выборе способа исследования и методики расчета. Кроме того, при одном цикле опробования пласта в процессе опытно-фильтрационных работ можно наметить отдельные периоды, когда применимы совершенно различные методы расчета. Расчетные значения коэффициента фильтрации могут оказаться зависимыми от используемого при этом способа определения. В качестве примера можно привести результаты опытов ВНИИГ по определению коэффициента фильтрации в одном из створов земляной русловой плотины Каховской ГЭС.

В цикл исследований, проведенных на этом сооружении, входили пробные откачки, наливы и опыты с солевыми и радиоактивными индикаторами. Целью исследований было определение причин аномального повышения кривой депрессии[1]. В основании плотины залегают мелкозернистые пески с коэффициентом фильтрации $k=7{,}0$ *м/сут*. Ниже песков идут лиманно-морские илы с $k=0{,}001 \div 0{,}0001$ *м/сут*. Толщина слоя ила от 1,0 до 4,5 *м*. Еще ниже — кварцевые мелко- и среднезернистые пески с $k=15$ *м/сут*. Тело плотины намыто из русловых песков с $k=5 \div 7$ *м/сут*. Разумеется, приведенные значения коэффициентов фильтрации определяют только некоторые средневзвешенные по всему сооружению значения искомых коэффициентов. Путем непосредственного опробования следовало выявить локальные значения коэффициентов фильтрации грунта, с тем, чтобы в даль-

[1] Некоторые сведения об этом объекте приведены в главе 9.

нейшем с помощью специального анализа по этим данным можно было бы судить о причинах, вызвавших указанный подъем кривой депрессии.

Перед опытами была проведена очистка пьезометров. При этом было установлено, что пьезометры сильно заилены, а рабочие части фильтров пьезометров заполнены гравийной засыпкой. Опыты проводились сперва путем откачек и наливов, затем

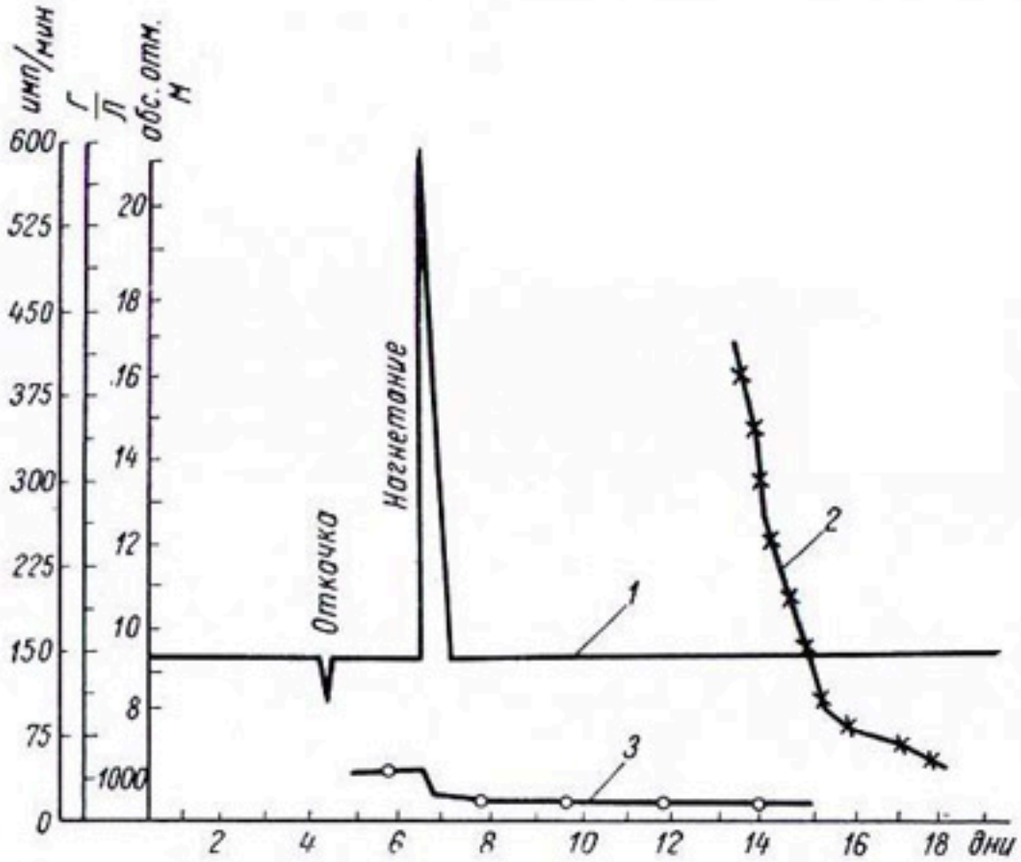


Рис. 5-8. Результаты экспериментального обследования типового пьезометра.

1 — график изменения уровня воды в пьезометре, *м*; *2* — график изменения концентрации радиоактивного индикатора, *имп/мин*; *3* — график изменения концентрации солевого индикатора, *мг/л*.

были пущены солевые индикаторы (поваренная соль) и несколько позже — радиоактивные (йодистый калий с J-131). Результаты опытов для одного из пьезометров приведены на рис. 5-8. По данным откачек и наливов были высчитаны соответствующие значения коэффициентов фильтрации по зависимости (5-23), приведенные в табл. 5-4.

По данным опытов с солевыми индикаторами значения скорости фильтрации оказались близкими к нулю, а по результатам опытов с радиоактивными индикаторами значения скорости фильтрации для пьезометра 4 составили примерно 0,3 *м/сут*, что при градиенте напора $I=0{,}02$ дает значения коэффициента фильтрации около 15 *м/сут*, примерно совпадающие с результатами опытов по откачке.

Пример такого разброса данных не единичен. Остановимся на причинах этих явлений, с тем чтобы сделать некоторые рекомендации относительно условий рациональной организации опытно-фильтрационных исследований с помощью одиночных скважин.

В рассмотренном случае определения коэффициента фильтрации наблюдающееся несоответствие результатов, несомненно, объясняется явлениями кольматации и особенностями устройства рабочей части фильтра. В самом деле, содержание илистых частиц в фильтрационном потоке, не раз отмечавшееся при взятии проб воды из этих пьезометров, резко увеличивалось после взмучивания осадка при очистке. Поэтому при нагнетании воды в поток во время налива эти взвешенные частицы образовывали слабо проницаемый экран на фильтровом слое. Соответственно наличие гравийной засыпки в фильтре затрудняло введение индикатора в фильтровую часть пьезометра, а солевой раствор в застойной части пьезометра выше фильтра, видимо, мало диффундировал в зону интенсивного водоразбавления. При запуске радиоактивного индикатора этот недостаток сказался значительно меньше по той причине, что определение активности такого индикатора, как J-131 с сильно проникающим гамма-излучением проводится практически по всему объему, заполненному индикатором (в условиях пьезометров Каховской ГЭС такой объем имел высоту всего 0,5—1,0 *м*). Поэтому изменение концентрации индикатора в зоне интенсивного водообмена, по-видимому, ощущалось достаточно отчетливо, хотя в застойной области содержание индикатора менялось мало.

Таблица 5-4

Результаты расчетов коэффициента фильтрации по данным наливов и откачек

Номер пьезометра	Коэффициент фильтрации, *м/сут*	
	Вид опробования	
	Налив	Откачка
2	0,0008	5,2
3	0,00035	2,6
4	0,062	15,0
5	0,0069	2,7
6	0,0036	5,3

Из сказанного можно сделать вывод, что всюду, где это возможно, определение коэффициента фильтрации пластов следует проводить одновременно несколькими способами, поскольку сопоставление результатов исследований, выполненных в различных условиях, позволяет не только откорректировать и проверить полученные данные, но также и правильнее оценить особенности строения пласта и его фильтрационные свойства.

Следует развивать методику комплексных исследований водоносных пластов. При этом может широко использоваться сочетание метода откачек с методом индикаторов, наливов и откачек, лабораторных и полевых методов и т. д.

Опыт показывает, что такие комплексные исследования дают хорошие результаты. Например, успешное исследование фильтрационных характеристик слоистого пласта было проведено Мансуром [222]. При этом значения коэффициента фильтрации грунта в горизонтальном направлении определялись по результатам откачек, а в вертикальном направлении — по данным лабораторных исследований кернов грунта.

Сравнивая между собой различные способы опробования пластов, следует отметить, что при общих равных условиях предпочтительнее методы опробования уже насыщенных водоносных пластов. При опробовании фильтрационных характеристик неводоносных пластов путем их насыщения как расчетные зависимости, так и условия постановки опыта в общем являются менее точными, чем аналогичные исследования водонасыщенных грунтов.

При определении значений коэффициента фильтрации по данным о насыщении сухого грунта величина коэффициента фильтрации может быть сильно занижена за счет защемления воздуха при замачивании.

В целом менее точным методом определения фильтрационных характеристик грунта является и метод индикаторов, хотя для изучения качественной стороны фильтрационных процессов этот метод незаменим.

Наконец, коснемся вопроса сравнительной ценности методов опробования пластов путем откачек и нагнетаний. Поскольку возможность кольматирования стенок скважин, пример которого уже приводился выше, не исключается даже в несуффозионных грунтах, то откачки для исследования фильтрационных свойств пласта более целесообразны, чем нагнетания. В этом свете приводимые в литературе рекомендации о желательности проведения наливов и нагнетаний при высокой проницаемости грунта представляются малообоснованными [219]. К этому можно добавить, что, по мнению некоторых авторов, теория расчетов нагнетания в колодцы разработана еще недостаточно [201] и, следовательно, теоретически этот способ опробования пласта менее обоснован, чем способ откачек.

Из сказанного выше следует, что методика расчетов коэффициента фильтрации существенно зависит от режима фильтрации. Сопоставление расчета установившейся и неустановившейся фильтрации показывает, что расчет, основанный на зависимостях неустановившейся фильтрации, является во многих случаях гораздо более оправданным. Кроме того, проведение опытов при неустановившейся фильтрации значительно проще в техническом отношении. В этом свете следует рекомендовать внедрение расчетов по уравнениям неустановившейся фильтрации в практику фильтрационных исследований.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ УРОВНЕПРОВОДНОСТИ И ПЬЕЗОПРОВОДНОСТИ

§ 6-1. Общие сведения о коэффициентах уровнепроводности и пьезопроводности

Коэффициенты уровнепроводности и пьезопроводности, будучи различными по своей природе, имеют некоторую общность, так как оба эти коэффициента являются характеристиками скорости распространения деформации и давлений в фильтрационном потоке.

Коэффициент уровнепроводности, как было сказано в § 2-4, представляет собой отношение водопроводимости пласта к поверхностному коэффициенту водоотдачи или недостатка насыщения.

Коэффициент пьезопроводности определяется упругими свойствами жидкости и водопроницаемой среды. Формально оба названных коэффициента играют сходную роль в различных уравнениях неустановившейся фильтрации.

Определение названных коэффициентов имеет большое значение для анализа результатов натурных наблюдений, так как с помощью этих коэффициентов можно прогнозировать фильтрационный режим при колебаниях напора на границах питания пласта, определять режим водопонижения и решать другие практические вопросы.

Из определения рассматриваемых коэффициентов следует, что принципиально найти их величину можно тремя путями, во-первых, непосредственно из уравнений неустановившейся фильтрации, во-вторых, по данным о водопроводимости пласта и коэффициенте m', в-третьих, по данным о коэффициенте фильтрации, мощности пласта и коэффициенте m', вычисленных по отдельности.

В большинстве случаев первый путь установления величин коэффициентов уровнепроводности и пьезопроводности наиболее предпочтителен, поскольку при таком определении, осущест-

вляемом в натурных условиях, учитываются особенности залегания изучаемого пласта и физические свойства природных вод. Соответствующие исследования для оценки величины указанных коэффициентов проводятся по наблюдениям за процессом неустановившейся фильтрации при естественном режиме и при возмущенном потоке. Однако при подобном определении величины коэффициента пьезо- или уровнепроводности могут возникать существенные затруднения. Они связаны прежде всего с необходимостью использования соответствующих расчетных зависимостей, что, в свою очередь, сопряжено с заменой реального потока некоторой расчетной схемой, а следовательно, и с внесением в расчет известных условностей. Кроме того, при составлении исходного уравнения неустановившейся фильтрации иногда приходится учитывать такие условия на границах рассматриваемой области фильтрации, которые могут быть оценены только после специальных исследований. К подобным случаям можно, например, отнести изучение фильтрационного режима в гидравлически связанных пластах, учет испарения или инфильтрации на поверхности депрессии и т. д. На практике стремятся выбирать для определения искомого коэффициента такие периоды неустановившегося движения, в которых количество действующих факторов сведено к минимуму. Это не всегда бывает возможным и в результате приходится прибегать к другим способам определения коэффициентов пьезо- и уровнепроводности, основанным на дифференцированном подходе к изучению параметров, входящих в эти коэффициенты.

Изучению водопроводимости пласта H_k и коэффициента фильтрации k посвящена глава 5. Что же касается коэффициента водоотдачи m', то он, несомненно, заслуживает особого внимания.

Природа этого коэффициента может быть различной в зависимости от характера неустановившейся фильтрации. В m' по физической сущности объединены три разных коэффициента, характеризующих деформируемость пористой среды и фильтрующейся в ней воды, водоотдающую способность грунта и способность его к водонасыщению.

Методика определения таких коэффициентов и числовые значения их существенно отличаются друг от друга, причем эта разница особенно велика между коэффициентами водоотдачи и недостатка насыщения, с одной стороны, и коэффициентом упругоотдачи, с другой.

Определение названных коэффициентов может проводиться в натурных и в лабораторных условиях. В тех случаях, когда из натурного опыта нельзя получить одновременно значения k и или H_k и m' и один из этих параметров приходится определять в лаборатории, то предметом лабораторных исследований следует избирать m', поскольку величина его изменяется в меньшем диапазоне, чем k и H_k.

§ 6-2. Сущность понятий коэффициентов водоотдачи и недостатка насыщения

В современной технической литературе термин «коэффициент водоотдачи» является весьма распространенным, и принятое определение этого коэффициента, на первый взгляд, представляется вполне исчерпывающим. Вместе с тем, как это было показано в работе О. Н. Носовой [111], раскрытие подлинной сущности коэффициента водоотдачи, фигурирующего в тех или иных расчетах, вызывает известные трудности.

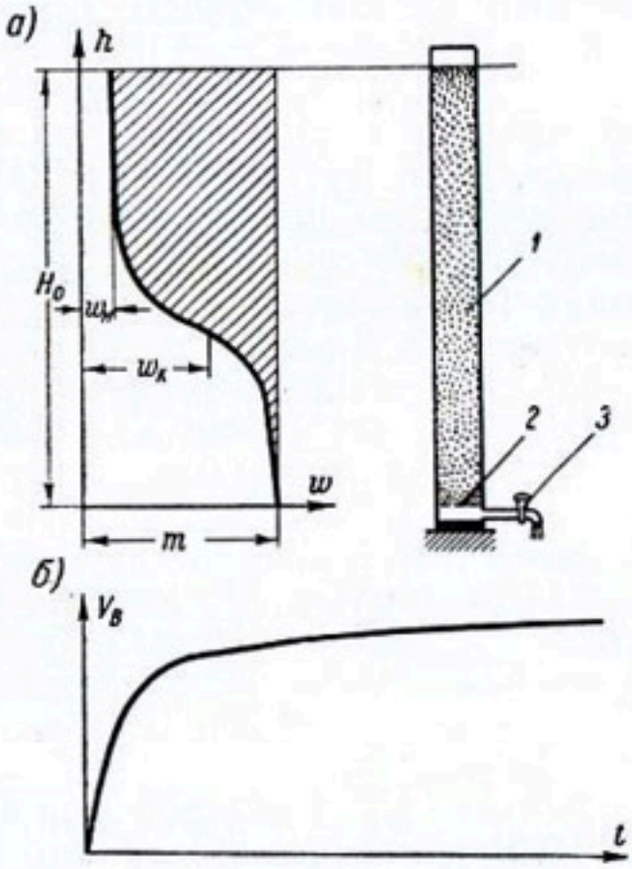


Рис. 6-1. Расчетная схема для определения количественных характеристик водоотдачи грунта: *а* — эпюра распределения остаточного влагосодержания по высоте осушенного образца грунта; заштрихованная площадь соответствует количеству воды, вытекшей из образца к моменту времени *t*; *б* — зависимость объема дренированной воды от времени.

1 — образец грунта (колонка); *2* — опорная решетка; *3* — кран.

В самом деле, обычно под коэффициентом водоотдачи понимают отношение объема воды, вытекающей под действием силы тяжести из полностью насыщенного грунта, к объему дренируемого грунта.

Кроме того, для образца грунта, полностью водонасыщенного перед началом опыта, тот же коэффициент можно определить и по остаточной влажности дренированного грунта:

$$m' = m - w_{ос}, \qquad (6\text{-}1)$$

где m — пористость; $w_{ос}$ — остаточное влагосодержание в объемном относительном выражении.

Легко показать, что как объем дренированной воды, так и объем дренируемого грунта можно трактовать поразному. Напомним, что водоотдача грунта, т. е. способность грунта отдавать насыщающую его влагу, проявляется при нарушении условий равновесия, когда начинается процесс дренирования. Стекание воды из грунта под действием силы тяжести происходит постепенно, причем со временем интенсивность дренирования непрерывно уменьшается. В процессе дренирования из грунта стекает не вся влага. Часть ее удерживается в порах сорбционными и капиллярными силами. В результате создается капиллярная кайма.

На рис. 6-1 иллюстрированы различные способы определения характеристик водоотдающей способности одного и того же

грунта, которые количественно могут различаться весьма существенно. Очевидно, что во избежание недоразумений необходимо пользоваться специальной терминологией, отражающей принципиальное различие отдельных способов характеристики водоотдающей способности грунта.

Проект такой терминологии предложен в работе [111]. Пользуясь положениями этой работы, дадим определение наиболее важных характеристик водоотдающей способности грунта.

1. Коэффициент водоотдачи грунта m_0' характеризует максимальную способность грунта к осушению под действием силы тяжести и определяется выражением:

$$m_0' = m - w_н, \tag{6-2}$$

где $w_н$ — содержание неподвижной влаги в порах, численно равное максимальной молекулярной влагоемкости при определении ее по способу высоких колонн и представленной в объемном относительном выражении[1]. Этот коэффициент является физической характеристикой грунта и при расчетах обычно используется для определения общего количества воды, подлежащей дренированию под действием силы тяжести.

2. Коэффициент водоотдачи капиллярной каймы $m_к'$ характеризует общую способность к водоотдаче грунта в зоне капиллярной каймы и определяется выражением

$$m_к' = \frac{mh - \int_0^h w_к dh}{h} = \frac{V_в}{V_г}, \tag{6-3}$$

где $w_к$ — влагосодержание в зоне капиллярной каймы высоты h, так называемая капиллярная влагоемкость, величина, изменяющаяся по высоте дренированного грунта. В расчетах $m_к'$ используется для оценки общего объема воды $V_в$, дренируемой при условии, что в осушаемом объеме грунта $V_г$ образуется капиллярная кайма, которая отсутствовала в исходном положении, например, дренирование пласта из состояния с затопленной поверхностью.

3. Поверхностный коэффициент водоотдачи (или просто коэффициент водоотдачи) m' характеризует водоотдающую способность пласта при расчетах процесса водоотдачи с помощью уравнений неустановившейся фильтрации и определяется отношением вертикальной составляющей скорости фильтрации на свободной поверхности расчетного потока к скорости опускания этой поверхности:

$$m' = \frac{v_z}{v_g}. \tag{6-4}$$

---

[1] Пояснение понятия максимальной молекулярной влагоемкости и способов ее определения приводится в [5, 141] и в других работах.

Перечень различных модификаций количественных характеристик водоотдающей способности пласта можно продолжить, но и уже приведенные сведения дают представление о многообразии способов количественной оценки водоотдачи.

Из указанных выше характеристик наиболее сложным понятием является поверхностный коэффициент водоотдачи. Этот коэффициент занимает особое место среди других количественных характеристик водоотдающей способности грунта, так как имеет фиктивный характер. В самом деле, в [111] показано, что коэффициент водоотдачи в уравнениях неустановившегося движения, тесно связанный с представлением о свободной поверхности расчетного потока, можно определить как отношение объема воды, стекающей из осушаемого грунта, к объему, освобождающемуся при опускании свободной поверхности потока и условно считаемому осушенным.

Теоретическое и экспериментальное изучение поверхностного коэффициента водоотдачи показывает, что для данного грунта этот коэффициент зависит от условий дренирования и, в зависимости от режима опускания свободной поверхности потока, может изменяться от нуля до величины, существенно превышающей не только коэффициент водоотдачи грунта, но даже и пористость.

Рекомендации по определению m' в зависимости от условия дренирования приводятся в [111].

Опыты показывают, что в условиях применимости уравнения Буссинеска этот коэффициент практически равен m_0'. По поводу количественных характеристик процесса водоотдачи можно сделать следующие общие замечания. Как явствует из приведенных выше определений, представление о коэффициенте водоотдачи неразрывно связано с процессом дренирования грунта. Поэтому в любой характеристике процесса водоотдачи непременно фигурирует объем воды, вытекающей или вытекшей из грунта под действием силы тяжести. Отсюда следует, что коэффициент водоотдачи грунта принципиально отличается от так называемой активной пористости, которая характеризует объем воды, движущейся в порах в процессе фильтрации. Природа сил, удерживающих от стекания влагу в образцах дренированного грунта, иная, чем сил, препятствующих движению влаги в полностью насыщенном водой поровом пространстве.

Изложенную классификацию характеристик водоотдачи можно распространить и на процесс водонасыщения грунта. Так, коэффициент недостатка насыщения, используемый в уравнениях неустановившейся фильтрации, также можно рассматривать как поверхностный коэффициент недостатка насыщения, определенный выражением (6-4). При этом необходимо помнить, что процесс водонасыщения в общем случае будет иметь характеристики, не совпадающие по величине со своими аналогами при процессе водоотдачи.

Особенности этих коэффициентов еще очень мало изучены, и если не считать отдельных небольших несистематизированных заметок [111, 237], сведений о них в литературе почти не встречается. На основании имеющегося опыта можно утверждать, что количественная оценка величины коэффициента недостатка насыщения более сложна, чем коэффициентов водоотдачи. Это объясняется тем, что полнота насыщения грунта, по-видимому, зависит не только от начальной влажности, режима перемещения поверхности потока, но и от направления движения. В качестве приближенной оценки величины коэффициента недостатка насыщения рекомендуется выражение:

$$m' = m - w_0, \tag{6-5}$$

где w_0 — начальная влажность.

В тех случаях, когда преувеличение величины m' не идет в запас расчета, выражение (6-5) можно заменять следующим:

$$m' = m - w_0 - w_в, \tag{6-6}$$

где $w_в$ — часть порового пространства, занятая защемленным воздухом, отнесенная к общему объему грунта.

§ 6-3. Определение коэффициентов водоотдачи и недостатка насыщения по натурным данным

В настоящее время для определения коэффициента водоотдачи непосредственно в натурных условиях рекомендуется несколько способов, которые, с точки зрения классификации наиболее интересных для практики видов водоотдачи, можно разделить на две группы. К одной из них относятся способы по определению поверхностного коэффициента водоотдачи, а к другой — коэффициентов водоотдачи грунта и капиллярной каймы. Способы, предназначенные для определения поверхностного коэффициента водоотдачи, например способ конечных разностей Г. Н. Каменского, Н. К. Гиринского [111], основаны на использовании уравнений неустановившегося движения. Они могут применяться также для определения других гидрогеологических параметров и поэтому рассматриваются ниже совместно со способами определения коэффициентов уровне- и пьезопроводности.

Остановимся на способах, которые могут быть использованы для определения коэффициентов водоотдачи грунта и капиллярной каймы. В качестве таких способов можно назвать определение этих коэффициентов путем пробного дренирования по результатам измерений влажности в осушаемой зоне до начала и после окончания опыта или по данным об общих размерах осушаемой зоны и объеме дренированной воды. Первый способ довольно подробно излагается в работах О. Мейнцера [99]. Для определения влажности грунта проводится отбор проб

в нескольких точках по высоте исследуемой зоны. Очевидно, что для этой же цели могут быть использованы и другие методы определения влажности грунтов, получившие развитие за последние годы как электрометрический метод [183], опыты с помощью нейтронных излучателей [169] и т. д.

Значение коэффициента водоотдачи в месте измерения влажности определяется по выражению:

$$m' = w_{z1} - w_{z2}, \tag{6-7}$$

где w_{z1} — влагосодержание грунта на высотной отметке z перед началом опыта; w_{z2} — влагосодержание грунта на той же отметке после окончания опыта.

Для общей характеристики изучаемого пласта значение искомого коэффициента можно определить как средневзвешенное из результатов отдельных измерений.

К недостаткам способа определения коэффициентов водоотдачи по влажностным характеристикам грунта следует отнести трудности организации измерений влажности в натурных условиях и относительно невысокую точность результатов измерений, а также сложность перехода от замеров локального характера к осредненным параметрам.

Свободны от необходимости осреднения результатов измерений способы, основанные на измерении объемов дренированной воды. Такие способы предложены некоторыми исследователями, в частности Н. Ф. Фединым [176] и Н. Я. Ярцевым [199]. Первый из названных авторов предлагает проводить определение искомого коэффициента водоотдачи по данным об откачке, сопровождаемой образованием депрессионной воронки.

Учитывая, что общий дебит скважины складывается из объема воды из осушаемой зоны грунта и из объема воды, поступающей со стороны границ питания изучаемого участка, гидрограф опытной откачки можно разделить соответственно на две составляющие Q_1 и Q_2. Для определения составляющей расхода, обусловленной поступлением от границ питания, необходимо сперва установить соответствующую зависимость от понижения S. Эта зависимость определяется экспериментально по данным откачек при заданном S в условиях установившегося режима или путем расчета при известном значении коэффициента фильтрации по уравнению Дюпюи (рис. 6-2, *а*). Пользуясь полученной кривой $S=f(t)$, построенной по данным опыта (рис. 6-2, *б*), можно найти искомую функцию $Q_2=f(S)$. Тогда остается только $f(S)=F_1(t)$ нанести на график, как это сделано на рис. 6-2, *в*, и по разности $Q - Q_2$ определить Q_1. Окончательно для оценки величины m' следует установить объем воронки депрессии и общий объем воды, выкачанной из этой воронки. Объем выкачанной воды $V_в$ определяется по заштрихованной площади на рис. 6-2, *в*, а объем воронки депрессии

$V_д$ — по уравнению Дюпюи или по показаниям пьезометров. Отсюда

$$m' = \frac{V_в}{V_д}. \tag{6-8}$$

Для проверки полученных данных могут быть использованы результаты наблюдений за восстановлением уровня. При этом строится гидрограф восстановления и вычитается из ординат кривой $Q_2 = F_2(t) = f(S)$. Для получения подлинных значений коэффициента m' длительность опытов должна быть не менее

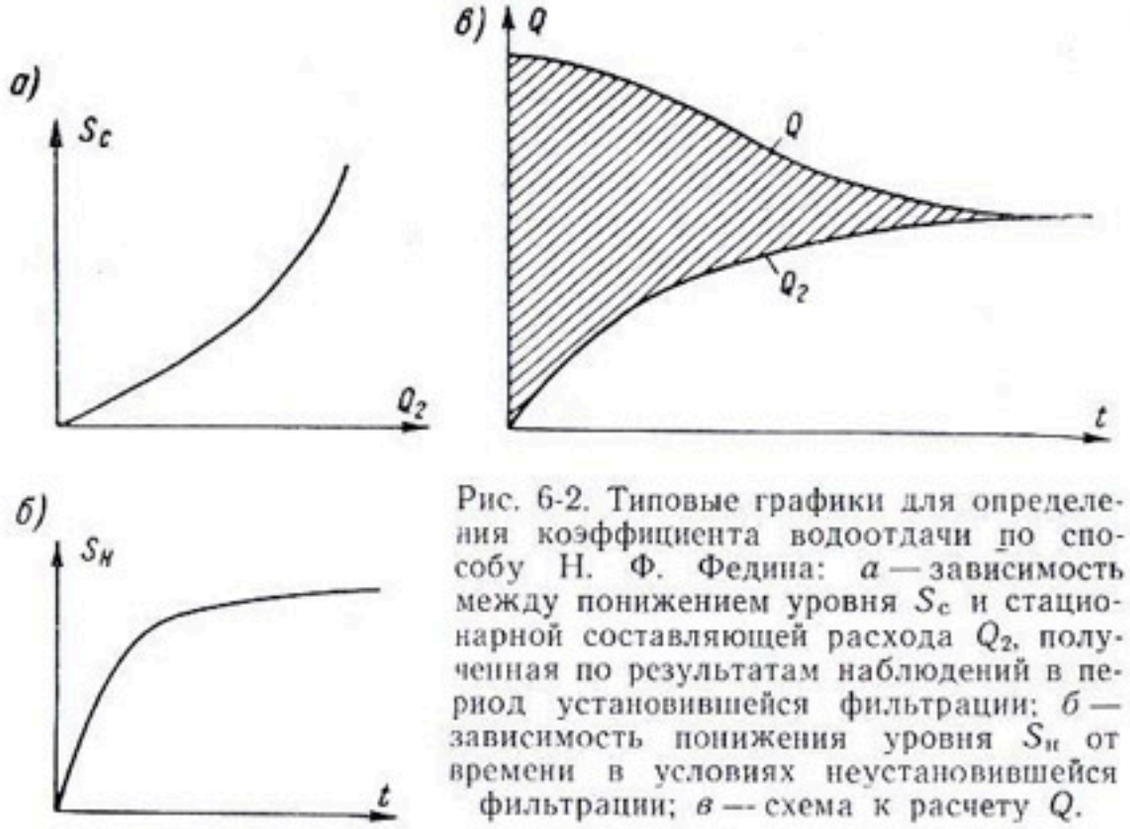


Рис. 6-2. Типовые графики для определения коэффициента водоотдачи по способу Н. Ф. Федина: *а* — зависимость между понижением уровня S_c и стационарной составляющей расхода Q_2, полученная по результатам наблюдений в период установившейся фильтрации; *б* — зависимость понижения уровня $S_н$ от времени в условиях неустановившейся фильтрации; *в* — схема к расчету Q.

нескольких суток, так как в противном случае величина m' может быть сильно занижена.

Способ расчета Н. А. Ярцева, опробованный им для определения коэффициента водоотдачи криворожских доломитов, применим в тех случаях, когда испытуемый участок является несколько обособленным от потока в остальной части пласта. Для определения коэффициента водоотдачи во время опыта проводится групповая откачка на испытуемом участке так, чтобы понижение зеркала грунтовых вод по всему участку происходило бы одновременно. Составляется уравнение баланса:

$$Q = Q_1 + Q_2, \tag{6-9}$$

где Q_1 — составляющая расхода за счет осушения участка исследования; Q_2 — составляющая расхода за счет питания извне участка исследования.

При известном характере изменения площади горизонтального сечения участка исследования по высоте пласта $\omega(z)$ для

заданного закона изменения уровня воды в пределах этого участка $H=f(t)$ можно найти закон изменения величины Q_1. В простейшем случае, при $\omega(z)=\text{const}$ для $H=f(t)$ — линейной функции времени, Q_1 будет постоянно и может быть представлено зависимостью:

$$Q_1 = m' \frac{\omega (H_1 - H_2)}{t_2 - t_1}, \tag{6-10}$$

где H_1 и H_2 — отметки уровня воды на участке исследования в моменты времени t_1 и t_2.

Вторая составляющая расхода определяется по данным о восстановлении уровня на участке исследования в предположении, что коэффициент недостатка насыщения численно равен коэффициенту водоотдачи и что расход в период заполнения осушенного участка практически не отличается от составляющей Q_2 в период откачки. Тогда, при тех же условиях в отношении зависимостей $\omega=f(z)$ и $H=f(t)$, искомая составляющая расхода будет

$$Q_2 = \frac{m'\omega (H_4 - H_3)}{t_4 - t_3}, \tag{6-11}$$

где H_3 и H_4 — уровни в моменты времени t_3 и t_4. Представив $\frac{H_1 - H_2}{t_2 - t_1}$ и $\frac{H_4 - H_3}{t_4 - t_3}$ как скорости подъема и опускания уровня v_1 и v_2, получим для коэффициента водоотдачи выражение:

$$m' = \frac{Q}{\omega (v_1 + v_2)}. \tag{6-12}$$

Поскольку допустимость предположений, сделанных при выводе уравнения (6-12), является спорной, то очевидно, что изложенный способ можно рекомендовать только для рекогносцировочной оценки величины коэффициента водоотдачи.

Не останавливаясь более на этом вопросе, отметим только, что частным случаем рассмотренных способов определения ориентировочного значения коэффициента водоотдачи на основе уравнения баланса является также способ, разработанный О. Б. Скиргелло [160].

Для определения коэффициента недостатка насыщения в натурных условиях могут использоваться приведенные выше способы расчета с помощью уравнений неустановившегося движения, а также способы, предназначенные для определения коэффициента водоотдачи при условии, что во время опыта происходит не дренирование, а насыщение грунта. Что же касается опытов по водонасыщению, основанных на наливах и нагнетаниях воды в сухой грунт, которые часто трактуются как способы определения коэффициента недостатка насыщения, то против применения их для оценки величины m' имеются неко-

торые возражения. В самом деле, как показывают лабораторные исследования, полнота насыщения грунта, а следовательно, и величина коэффициента недостатка насыщения зависит от направления потока при замачивании. Значения m' при инфильтрации оказываются гораздо ниже, чем при подъеме уровня. Можно предположить, что в натурных условиях эта разница будет менее заметной. Однако возможность распространения значений коэффициента m', полученных при инфильтрации, на случай подъема поверхности потока требует специальных исследований.

§ 6-4. Общие принципы выбора значений коэффициентов водоотдачи в расчетах

Значения коэффициентов водоотдачи, полученные экспериментальным путем в лаборатории или в натуре на отдельных участках изучаемого пласта, строго говоря, справедливы только для объемов грунта, исследованных в опыте. Для использования таких значений при расчетах приходится экстраполировать их на весь изучаемый массив. Поскольку рассмотренные в опыте условия могут оказаться не типичными для этого массива, то возможность экстраполяции найденных значений коэффициентов водоотдачи должна проверяться путем специального анализа.

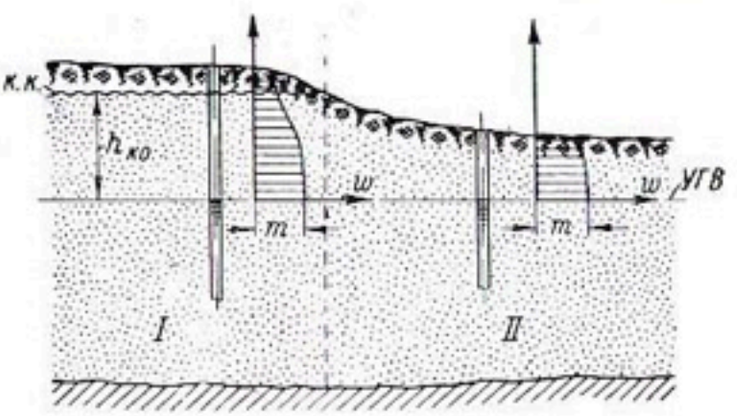


Рис. 6-3. Схематическое изображение влияния рельефа местности на величину коэффициента водоотдачи (коэффициент водоотдачи капиллярной каймы $m_к'$).

kk — поверхность капиллярной каймы; *УГВ* — уровень грунтовых вод.

Проиллюстрируем это на конкретных примерах. Прежде всего рассмотрим зависимость расчетных значений коэффициентов водоотдачи от изменений рельефа поверхности осушаемого пласта, когда необходимо учитывать условия образования капиллярной каймы по площади массива. Если начальный уровень грунтовых вод на опытном участке по отношению к дневной поверхности стоит ниже, чем на других участках, как, например, на участке *I* рис. 6-3, то при общей характеристике пласта следует учитывать, что полученное значение коэффициента капиллярной каймы в опыте превышает осредненное значение этого коэффициента для массива в целом. И, наоборот, при выборе в качестве опытного участка *II* значение коэффициента капиллярной каймы будет меньше среднего значения.

В тех случаях, когда опыты по определению коэффициента водоотдачи проводятся по всей площади испытуемого массива,

то при использовании полученных значений искомых коэффициентов применительно к оценке условий дренирования того же массива следует учитывать возможность изменений во времени значений коэффициента водоотдачи (или недостатка насыщения) за счет уплотнения или разрыхления грунта, изменения количества защемленного воздуха [217] [1] и т. д.

При определении величины поверхностного коэффициента водоотдачи необходимо также принимать во внимание зависимость этого коэффициента от режима дренирования. Словом, даже в таком наиболее благоприятном случае, когда определе-

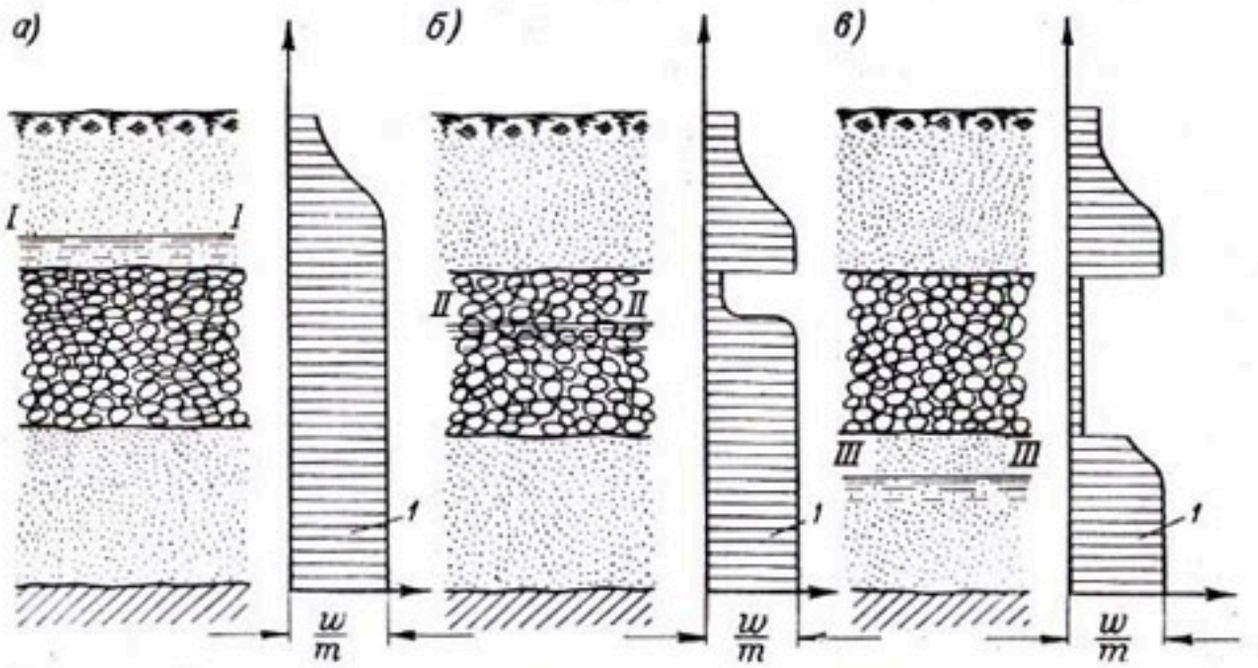


Рис. 6-4. Схема к расчету коэффициента водоотдачи слоистых грунтов: *а* — поверхность депрессии в верхнем слабопроницаемом слое; *б* — поверхность депрессии в сильно проницаемом слое; *в* — поверхность депрессии в нижнем слое.

1 — эпюры остаточного влагосодержания.

ние коэффициента водоотдачи проводится по данным наблюдений на всей изучаемой площади, полученные значения искомых коэффициентов следует систематически проверять, ибо они, как и другие фильтрационные характеристики грунта, имеют тенденцию изменяться с течением времени.

Рассмотрим теперь влияние на величину коэффициентов водоотдачи неоднородности строения пласта по вертикали. Учет особенностей строения пласта по вертикали особенно важен в тех случаях, когда оценка величины искомых коэффициентов для всей толщи массива производится по результатам испытаний при относительно небольших колебаниях уровня грунтовых вод. Для примера обратимся к случаю слоистого пласта, изображенного схематически на рис. 6-4.

---

[1] В работе [217] в лаборатории проверялась зависимость m' от условий подготовки грунта к опыту. В результате значения m' отличались на порядок.

Пусть перед началом опыта исследуемый пласт полностью затоплен. Тогда по мере опускания поверхности грунтового потока происходит образование капиллярной каймы. Допустим, что во время опыта процесс дренирования считается законченным, когда поверхность потока занимает положение *I—I* (рис. 6-4, *а*). Очевидно, что полученные по данным опыта значения поверхностного коэффициента водоотдачи и коэффициента капиллярной каймы существенно зависят от глубины понижения поверхности потока и не могут характеризовать расположенную ниже толщу грунта. Пусть теперь во время опыта будет достигнуто более глубокое понижение поверхности *II—II* потока, так чтобы область дренирования захватила второй слой пласта (рис. 6-4, *б*). Если при этом водопроницаемость верхнего слоя оказывается меньше водопроницаемости нижнего слоя, как это показано условно на рис. 6-4, то в верхнем слое образуется так называемая подвешенная капиллярная кайма [111], высота которой в общем случае зависит от соотношения между коэффициентами фильтрации контактирующих слоев. По эпюре остаточного влагосодержания, приведенной на рис. 6-4, видно, как сильно это обстоятельство может сказаться на величине коэффициента водоотдачи. Для исключения влияния абсолютной величины пористости, с целью большей наглядности, на эпюре представлены значения влагосодержания, отнесенные к пористости. Наконец, из рис. 6-4, *в* ясно, что при понижении поверхности потока до положения *III—III* можно получить новое значение коэффициента водоотдачи, отличное от определенных в двух предыдущих опытах.

Из рассмотренного случая видно, что наличие в грунте горизонтальных прослоев даже небольшой мощности, присутствие которых мало сказывается на величине коэффициента фильтрации, может коренным образом изменить расчетные значения коэффициента водоотдачи.

В случаях водопонижения в слоистых пластах, строение которых в общих чертах заранее известно, в порядке рекогносцировочной оценки искомых значений коэффициента водоотдачи можно рекомендовать следующее. Значение поверхностного коэффициента водоотдачи при понижении свободной поверхности потока в пределах высоты капиллярного поднятия для данного грунта $h_{к1}$ следует принимать равным нулю. При дальнейшем опускании поверхности потока в условиях плавно изменяющегося движения можно считать m' равным коэффициенту водоотдачи грунта (§ 6-3).

В случае дренирования слоистого нескального пласта влияние нижнего слоя на величину поверхностного коэффициента водоотдачи может ощущаться только при опускании зоны полного насыщения капиллярной каймы в первом (верхнем) слое (приблизительно высота этой зоны 0,2—0,3 высоты максимального капиллярного поднятия $h_{к1}$) ниже линии раздела слоев.

Далее расчет величины m' проводится в зависимости от соотношения коэффициентов фильтрации дренируемых слоев (имеются в виду коэффициенты фильтрации в вертикальном направлении). Для случая $k_1 > k_2$ при опускании поверхности депрессии от линии раздела на глубину от (0,2—0,3) $h_{к1}$ до $h_{к2}$ (высота капиллярного поднятия во втором слое) принимается $m' \approx 0$, а затем m' определяется из условий дренирования второго слоя. Для случая $k_1 < k_2$ при определении m' следует принимать во внимание возможность создания подвешенной капиллярной каймы. Поэтому расчет величины искомого коэффициента, исходя из особенностей водоотдающей способности нижнего пласта, следует проводить только после опускания поверхности расчетного потока на величину $n_{к1}$ ниже линии раздела слоев.

Несколько иначе обстоит дело с определением коэффициента водоотдачи капиллярной каймы $m_к'$. В тех случаях, когда распределение влагосодержания в пределах капиллярной каймы происходит по параболе, пользуясь зависимостью, предложенной С. Ф. Аверьяновым [2], можно теоретически получить

$$m'_к = w_1 \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{y}{H_k}} \left[1 - \left(\frac{w_0}{w_1} \right)^2 \right] \right\}, \qquad (6\text{-}13)$$

где y — ордината слоя с влажностью w_1. При неизвестном законе изменения влажности и при дренировании пласта в пределах верхнего слоя величину $m_к'$ можно ориентировочно оценить выражением

$$m'_к = m'_0 \frac{h - (h_к - h_{к0})}{h}, \qquad (6\text{-}14)$$

где h — кажущаяся мощность дренированного слоя, равная разности отметок начального и конечного положений поверхности потока; $h_{к0}$ — высота капиллярной каймы перед началом опыта. В затопленном состоянии $h_{к0} = 0$, а в исходном положении с полностью развитой капиллярной каймой $h_{к0} = h_к$.

При дренировании многослойного пласта результирующее значение коэффициента водоотдачи капиллярной каймы определяется по формуле:

$$m'_к = \frac{m'_{0(1)}(b_1 - h_{к.п1}) + m'_{0(2)}(b_2 - h_{к.п2}) + \ldots + m'_{0(n)}(b_n - h_{к.пn})}{\sum_{i=1}^{n} b_i}, \qquad (6\text{-}15)$$

где индексы 1, 2, ..., n определяют номер рассматриваемого слоя сверху вниз; b — мощность слоя; $h_{к.п}$ — высоты подвешенной капиллярной каймы, которые можно определить из формулы:[1]

$$h_{к.пi} = h_{кi} - h_{кi+1}. \qquad (6\text{-}16)$$

[1] Принимается во внимание только положительное значение $h_{кпi}$.

Аналогичные рассуждения можно провести и при оценке величины коэффициента недостатка насыщения с той разницей, что ввиду явления гистерезиса [111] соответствующие значения капиллярного поднятия при подъеме поверхности потока должны быть меньше, чем в условиях дренирования. Кроме того, при расчете ориентировочных значений искомых коэффициентов недостатка насыщения в слоистых грунтах влияние вышележащего слоя следует учитывать только в тех случаях, когда свободная поверхность потока находится ниже линии раздела слоев на величину $h_к'$, меньшую величины капиллярного поднятия данного слоя. При анализе данных опыта по насыщению абсолютно сухого грунта влияние слоистости на величине коэффициента недостатка насыщения вообще не будет сказываться, хотя интенсивность развития процесса может сильно меняться в зависимости от соотношения между капиллярными потенциалами [1] насыщаемых слоев.

§ 6-5. Определение фильтрационных параметров пластов по режимным наблюдениям

Если по данным натурных наблюдений за уровнями грунтовых вод требуется определить некоторые общие фильтрационные характеристики водоносного пласта, а именно: коэффициент фильтрации, водоотдачи или недостатка насыщения и интенсивность инфильтрации, то можно воспользоваться дифференциальным уравнением фильтрации (2-30). Последнее представляется в конечных разностях применительно к сетке, вычерченной на плане территории. Такой способ разрабатывался и применялся многими исследователями в СССР и за границей [34, 71, 182, 232 и др.].

Существует значительное количество расчетных уравнений в различной модификации для разных случаев движения грунтовых вод.

Рассмотрим наиболее общий случай водоносного пласта, подстилаемого криволинейным водоупором, причем положим, что пласт имеет слоистое сложение и что в этом пласте происходит неустановившаяся фильтрация. Принимая условие Дюпюи, будем считать, что поверхности равных напоров в потоке представляют собой цилиндрические поверхности с вертикальными образующими.

Как было указано в § 2-7, дифференциальное уравнение неустановившейся фильтрации в таком случае будет иметь вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(H_k \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(H_k \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \varepsilon = m' \frac{\partial H}{\partial t}\,. \qquad (6\text{-}17)$$

---

[1] Капиллярным потенциалом принято называть $p_к/\gamma$, где $p_к$ — капиллярное давление [111].

При составлении карт прогноза распространения подпора грунтовых вод во время наполнения водохранилища, а также при прохождении паводков необходимо знать изменение по площади величины водопроводимости H_k. Эта величина в общем случае может быть определена по формулам (2-13) и (2-14). Однако для этой цели необходимо знать коэффициенты фильтрации и мощности пластов или же в случае непрерывного изменения коэффициента фильтрации по вертикали его значения на разных отметках.

Между тем при составлении карт гидроизогипс вовсе не обязательно располагать значениями коэффициента фильтрации в каждом слое и можно довольствоваться сведениями только о водопроводимости пласта [9], не затрагивая его структуры.

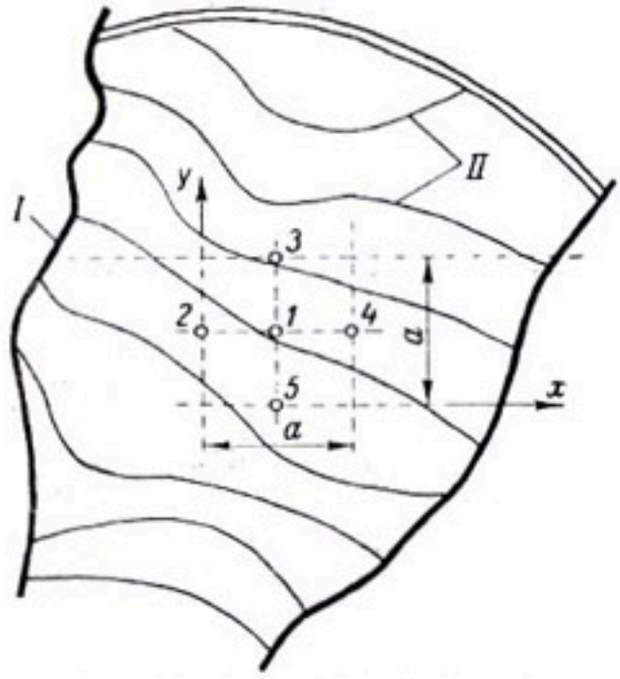


Рис. 6-5. Схема куста пьезометрических скважин при исследованиях водопроводимости пласта.

I — река, *II* — гидроизогипсы; *о* — пьезометрические скважины.

Для определения коэффициента водопроводимости безнапорного пласта по данным натурных наблюдений необходимо иметь на исследуемой территории ряд наблюдательных точек, в которых систематически производятся замеры уровней грунтовых вод. Расположение этих точек в плане должно быть таким, чтобы по показаниям пьезометров было возможно построить карту гидроизогипс для различных моментов времени. Для определения водопроводимости в окрестности одной точки необходимо иметь пять наблюдательных скважин (рис. 6-5).

Представим уравнение (6-17) в конечных разностях, причем, имея в виду слабое изменение H_k в пределах площади, ограниченной сторонами квадрата, на которых расположены наблюдательные скважины, примем H_k постоянным. Тогда вместо (6-17) будет:

$$\frac{H_k}{a^2}(h_2 + h_3 + h_4 + h_5 - 4h_1) = m' \frac{\Delta_t H_1}{\Delta t} - \varepsilon, \qquad (6\text{-}18)$$

где a — сторона квадрата; $\Delta_t H_1$ — изменение глубины в точке *1* за промежуток времени Δt; $h_1, h_2, \ldots, h_5$ — напоры в соответствующих индексам наблюдательных точках, средние за промежуток времени Δt.

Иногда при неравномерном изменении уровней воды в наблюдательных скважинах $\Delta_t H_1/\Delta t$ в (6-18) можно вычислять не по изменению глубины в центральной скважине *1*, а по среднему изменению глубины по площади, а именно:

$$\left(\frac{\Delta_t H_1}{\Delta t}\right)_1 = \frac{\Delta_t H_2 + \Delta_t H_3 + \Delta_t H_4 + \Delta_t H_5 + 4\Delta_t H_1}{8\Delta t}. \qquad (6\text{-}19)$$

Так или иначе, вычисляя $\Delta_t H_1/\Delta t$, можем определить водопроводимость пласта в точке *1* из (6-18):

$$H_k = \frac{a^2 (m' \Delta_t H_1 - \varepsilon \Delta t)}{(h_2 + h_4 + h_3 + h_5 - 4h_1)\,\Delta t}. \qquad (6\text{-}20)$$

Наличие инфильтрации, величину которой трудно учесть с надлежащей точностью, может значительно снизить точность определения H_k, а потому это определение желательно производить для таких периодов времени, когда $\varepsilon = \text{const}$ или же $\varepsilon = 0$.

Расчеты, проведенные нами для конкретного и достаточно сложного в отношении геологии примера правого берега Каховского гидроузла, показали, что в ряде точек численные значения H_k вполне точно совпадают со значениями, вычисленными по формуле (6-18) для коэффициентов фильтрации отдельных пластов. Лишь в некоторых точках получились значительные расхождения. Следует отметить, что иногда небольшая погрешность при определении напоров h_i может дать значительную погрешность при определении H_k, так как в знаменателе формулы (6-20) имеется сумма четырех разностей $h_i - h_1$, где $i = 2, 3, 4, 5$, причем величины h_i и h_1 при небольшом уклоне поверхности депрессии будут близкими.

Заметим, что на основании изложенного способа определения водопроводимости из уравнения (6-20) можно, вычислив предварительно H_k, найти интенсивность инфильтрации ε за определенный промежуток времени Δt.

Из уравнения (6-20)

$$\varepsilon = m' \frac{\Delta_t H_1}{\Delta t} - \frac{H_k}{a^2}(h_2 + h_4 + h_3 + h_5 - 4h_1). \qquad (6\text{-}21)$$

В последние годы предпринимается попытка дальнейшего развития методики численного анализа результатов наблюдений за режимом фильтрационного потока. Так, например, в [168] предлагается интегральное преобразование уравнений неустановившейся фильтрации с помощью некоторых модулирующих функций. В результате эти уравнения могут быть решены относительно искомых параметров фильтрационного потока с помощью унифицированных алгоритмов, что позволяет определять искомые параметры по данным об изменении уровня грунтовых вод. Разработка такой методики в дальнейшем позволит широко применять в фильтрационных расчетах счетные машины.

Подобная задача для частного случая одномерного потока с горизонтальным водоупором уже решена Н. А. Огильви [120], причем при решении использован графический метод.

§ 6-6. Оценка величины коэффициентов пьезо- и уровнепроводности по показаниям одиночных пьезометров

В ряде случаев наблюдения за поведением подземных вод проводятся с помощью небольшого количества пьезометров, распределенных произвольно по площади изучаемого массива. В результате, вследствие существенной неоднородности исследуемых грунтов и недостаточности числа наблюдательных точек, создаются условия, когда проведение вычислений методом конечных разностей практически оказывается невозможным. При этом зачастую область, охваченная пьезометрической сетью, по своей протяженности бывает недостаточна для того, чтобы проследить за распространением волны возмущения, вызванной изменениями граничных условий. Тогда для характеристики фильтрационных свойств исследуемых пластов приходится использовать показания одиночных пьезометров в период неустановившейся фильтрации. Методика таких исследований разрабатывалась в работах отечественных и иностранных авторов [18, 114, 168 и 34].

Для определения коэффициента уровнепроводности a Д. Г. Феррисом [34] использована зависимость между временем запаздывания и длиной волны синусоидальных колебаний уровней воды в пьезометрах, с одной стороны, и графиком колебания уровней воды в реке, с другой (метод амплитуд). Возможность использования полученной Феррисом расчетной зависимости проверена на результатах опытных откачек и лабораторных исследований. Эта зависимость при размерности входящих в нее величин в метрах и сутках имеет вид:

$$0{,}59\left(\frac{m'}{H_k t_0}\right)=\left[-\frac{\lg\frac{S_r}{2S_0}}{x}\right]^2, \qquad (6\text{-}22)$$

где $\frac{m'}{H_k}=\frac{1}{a}$; t_0 — продолжительность подъема уровня; x — расстояние между рекой и пьезометром;

S_r — продолжительность колебания уровня подземных вод;

S_0 — амплитуда колебания уровня воды в реке.

Определение искомой характеристики пласта может быть проведено также и по данным о запаздывании максимума подъема уровня подземных вод. Расчетная формула имеет вид

$$a=\frac{H_k}{m'}=\frac{0{,}08x^2t_0}{t_з^2}, \qquad (6\text{-}23)$$

где $t_з$ — средняя величина времени запаздывания, т. е. разность отсчетов времени, соответствующих максимальным подъемам уровней воды в реке и скважине.

К недостаткам указанного метода можно отнести некоторую неопределенность значений величин, входящих в расчетную зависимость. При расчете не учитывается также влияние собственной емкости пьезометра, что при низких значениях коэффициента фильтрации может иметь существенное значение.

Вопросы анализа материалов наблюдений за одиночными пьезометрами в условиях гидротехнических сооружений исследовались во ВНИИГ. Специфика работы таких пьезометров обусловлена случайными колебаниями напора из-за непредусмотренных помех (ремонт пьезометров, течи, определение дебитов соседних пьезометров, суточные колебания уровней бьефов и т. д.). Кроме того, практикуемая на сооружениях периодичность измерений напора (один раз в декаду или один раз в месяц)[1] затрудняет определение амплитуд колебания напора. Все это исключает возможность использования зависимостей, приведенных выше. Тем не менее легко показать, что можно провести приближенный анализ результатов наблюдений, накапливающихся в процессе строительства и эксплуатации сооружений и представляющих большой практический интерес. При этом источником информации могут являться показания пьезометров в период паводка, когда измерения напоров обычно проводятся чаще (5—6 раз в месяц).

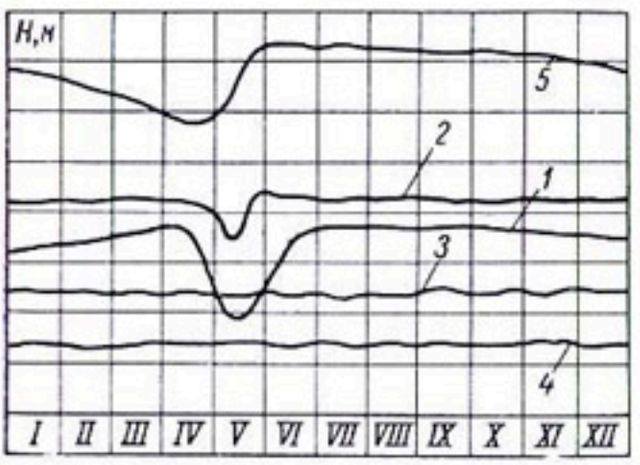


Рис. 6-6. Типовые графики приведенного пьезометрического напора.

1 — в малопроницаемом пласте; *2* — в пласте средней проницаемости; *3* — в сильно проницаемом пласте; *4* — уровень нижнего бьефа; *5* — уровень верхнего бьефа.

Поясним сказанное на примере. Рассмотрим показания трех напорных пьезометров[2], контролирующих основание бетонной плотины Камской ГЭС (рис. 6-6). Для большей наглядности на том же рисунке представлены графики колебания уровня воды в верхнем и нижнем бьефах.

При неизменной форме грунтового потока в недеформируемой пористой среде приведенный пьезометрический напор должен быть величиной постоянной. Вместе с тем из рис. 6-6 видно.

---

[1] Следует отметить, что теоретически подобная периодичность допустима только в условиях полностью стабилизированного режима.

[2] Пьезометр напорный, поэтому собственной емкостью его можно пренебречь.

что с течением времени приведенный пьезометрический напор меняется, особенно в период паводка, когда он резко падает, и падение это столь существенно, что его нельзя объяснить случайными причинами.

Связь названных колебаний напора с паводком очевидна еще и потому, что подъем приведенного напора пьезометра относится к периоду уменьшения интенсивности подъема уровня верхнего бьефа.

Изменение приведенного напора при отсутствии резких изменений водопроницаемости грунта характеризует упругие свойства пласта.

О. Н. Носовой было введено понятие инерционности пьезометра. Инерционность пьезометров определяется по отношению разности напоров: стабильного напора в данной точке, т. е. характерного для условий установившейся фильтрации, и временного, т. е. зафиксированного в рассматриваемый момент времени, к разности напоров перед паводком и в конце паводка [168].

Расчетная зависимость для определения искомых характеристик еще не получила полной апробации, поэтому приводить ее здесь преждевременно, тем не менее имеющиеся представления об инерции уже могут быть использованы для качественного анализа, поскольку часто имеет значение не столько количественная оценка, сколько качественная, направленная к определению общих закономерностей развития. Можно сравнивать амплитуды одного и того же пьезометра в разные годы жизни сооружения. Также могут быть подвергнуты сравнению показания пьезометров, установленных в разных частях сооружения. Показания типовых пьезометров на участках основания с различной водопроницаемостью приведены на рис. 6-6.

§ 6-7. Определение коэффициентов пьезо- и уровнепроводности по результатам откачек

Как отмечалось, опытные откачки (нагнетания) относятся к весьма эффективным способам определения фильтрационных свойств изучаемых пластов. Результаты наблюдений за режимом грунтового потока в период неустановившейся фильтрации при откачке являются одним из основных источников информации для определения коэффициентов пьезо- или уровнепроводности. Преимущества опытных откачек перед режимными наблюдениями состоят в возможности некоторого регулирования режима фильтрации путем создания определенного режима откачки.

Принципиально откачки, а также нагнетания могут осуществляться при любых горных выработках, например траншеях, одиночных скважинах, тоннелях, шурфах, батареях скважин и т. д. Но для определения фильтрационных характеристик пласта практическое применение имеют главным образом от-

качки из одиночных скважин и батарей скважин, и потому ниже мы рассмотрим именно эти случаи. Сведения о методике расчетов по данным наблюдений за работой различных горных выработок можно найти в соответствующей литературе [121, 167].

Используемые на практике расчетные зависимости получены методом сложения течений. В случае одиночной скважины при неустановившейся фильтрации уравнение (2-39) можно записать в виде

$$S = \frac{Q}{2\pi kT} \Phi(u), \tag{6-24}$$

где T — мощность пласта, если пласт ограниченной мощности, или длина затопленной части фильтра в случае пласта неограниченной мощности ($T=l$); в безнапорном потоке $T=H_0-\frac{S}{2}$, где H_0 — естественная мощность потока, а $l=l_0-0{,}25(S_1+S_2)$, где l_0 — длина затопленной части фильтра при $Q=0$; S_1 и S_2 — понижение в моменты t_1 и t_2; $\Phi(u)$ — фильтрационное сопротивление скважины при неустановившемся режиме; $u=r^2/4at$ — расчетный параметр, где r — расстояние от оси испытуемой скважины до точки, в которой определяется параметр u.

Уравнение (6-24) относительно $\Phi(u)$ нельзя решить, так как обычно коэффициент k неизвестен. Для получения недостающего условия используются результаты наблюдений за скважиной для двух различных моментов времени. Так, при $Q=\text{const}$ имеем для напорного потока

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\Phi(u_1)}{\Phi(u_2)} \tag{6-25}$$

и для безнапорного

$$\frac{S_1}{S_2}\,\frac{(H_0-0{,}5S_1)}{(H_0-0{,}5S_2)} = \frac{\Phi(u_1)}{\Phi(u_2)}. \tag{6-26}$$

Соответственно при $S=\text{const}$ имеем

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\Phi(u_1)}{\Phi(u_2)}. \tag{6-27}$$

Значение $\Phi(u)$ для пласта ограниченной мощности определяется выражением [32, 34]:

$$\Phi(u) = -\operatorname{Ei}(-u) + \Phi_{\text{н}}\left(u,\ \frac{l}{T},\ \frac{T}{r}\right), \tag{6-28}$$

где $\Phi_{\text{н}}\left(u,\ \frac{l}{T},\ \frac{T}{r}\right)$ — функция сложного вида. Первый член в правой части выражения (6-28) определяет фильтрационное сопротивление совершенной скважины, а $\Phi_{\text{н}}$ — соответственно сопротивление, обусловленное несовершенством скважины

(в случае совершенной скважины или скважины в пласте неограниченной мощности $\Phi_н=0$). Для определения параметра u разработаны специальные способы, в основе которых в общем случае лежит метод последовательных приближений (см. § 6-8). При известном значении u

$$a = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_1^2}{u_1 t_1}, \tag{6-29}$$

где u_1 — параметр, найденный из (6-25) или (6-26) для заданных значений r_1 и t_1.

При малых значениях u функция $\Phi_н$ вырождается в постоянную Φ_0 и может быть определена так же, как фильтрационное сопротивление несовершенной скважины в условиях установившейся фильтрации (см. табл. 5-3). Соответственно функция $\mathrm{Ei}(-u)$, называемая интегральным экспоненциалом (интегральная показательная функция) и определяемая по специальным таблицам, при малых u может быть аппроксимирована выражением:

$$\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \approx -\left(\ln\frac{r^2}{4at} + 0{,}577\right) = \ln\frac{2{,}25at}{r^2}. \tag{6-30}$$

Тогда (6-28) будет иметь вид

$$\Phi^*(u) = \ln\frac{2{,}25at}{r^2} + \Phi_0\left(\frac{T}{r}, \frac{l}{T}\right). \tag{6-31}$$

В этом случае для $\Phi(u)$ взамен (6-25) и (6-26) можно написать

$$\Phi(u_1) = \frac{S_1}{S_2 - S_1} \ln\frac{t_2}{t_1} \tag{6-32}$$

при напорном потоке и

$$\Phi(u_1) = \frac{S_1(H_0 - 0{,}5S_0)}{(S_2 - S_1)[H_0 - 0{,}5(S_1 + S_2)]} \ln\frac{t_2}{t_1} \tag{6-33}$$

при безнапорном потоке, а также

$$\Phi(u_1) = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \ln\frac{t_2}{t_1}. \tag{6-34}$$

Период неустановившейся фильтрации, для которого справедлива зависимость (6-31), обычно называют неустановившейся фильтрацией в упорядоченном режиме или квазистационарным режимом фильтрации.

Для практики большое значение имеет определение пределов применимости расчетных зависимостей (6-32), (6-33) и (6-34). Как показывает анализ, эти зависимости применимы при условии

$$\frac{r^2}{4at} < u_r, \tag{6-35}$$

где u_r — некоторое предельное значение u_1, зависящее от T/r и l/T. По данным, приведенным в работе [25], $u_r = 0{,}05 \div 0{,}1$.

Н. Н. Веригин [32], кроме того, предлагает определять u_r в зависимости от T/r и l/T более дифференцированно и ориентироваться на критическое значение фильтрационного сопротивления Φ_r.

Соответствующее предельное условие для параметра Φ, при котором возможен расчет по зависимостям (6-32) — (6-34), имеет вид

$$\Phi \geqslant \Phi_r + \Phi_0, \tag{6-36}$$

где

$$\Phi_r = \ln \frac{0{,}56}{u_r}. \tag{6-37}$$

Предельные значения Φ_r в зависимости от T/r и l/T задаются соответствующими графиками и с возрастанием T/r изменяются примерно от 1 до 12. В случае совершенных скважин или при $T/r \leqslant 1$ можно считать $\Phi_r = 1{,}32$, т. е. условие применимости зависимостей квазистационарной фильтрации примет вид

$$\Phi \geqslant 1{,}32. \tag{6-38}$$

При наличии двух наблюдательных скважин достаточно иметь измерения на один определенный момент времени.

Зависимости (6-25), (6-26), (6-29) и (6-32) — (6-34) могут быть использованы для расчета откачек в пластах неограниченной мощности с той лишь разницей, что $\Phi(u)$ в формулах (6-25), (6-26) принимается равным $-\mathrm{Ei}(-u)$, а Φ_0 в формуле (6-31) равным нулю.

Учет граничных условий проводится в соответствии с данными § 5-3.

Некоторую специфику имеют расчеты фильтрационных характеристик пласта в условиях затухающего возмущения потока, т. е., например, в условиях восстановления уровня после откачки. Точное решение для этого случая можно получить, исходя из условия, что поток к скважине во время восстановления уровня является суммой двух потоков, один из которых вызван действием постоянного стока с дебитом Q, существующего с момента начала откачки, а другой — действием некоторого источника с тем же дебитом, но существующим только с момента прекращения откачки. Тогда с несколькими допущениями, а именно: считая время восстановления уровня малым по сравнению со временем предшествующей откачки и пренебрегая аккумулирующей емкостью скважины, приближенный расчет искомых характеристик проводится по тем же расчетным зависимостям (6-25), (6-32), что и в рассмотренных ранее случаях. Единственной отличительной особенностью расчетов по данным о восстановлении уровня является способ определения расчетного понижения в скважине. В этом случае искомое

значение S устанавливается не по отношению к статическому горизонту воды при $Q=0$, а по отношению к положению уровня в скважине после откачки перед началом процесса восстановления (иначе говоря, S определяет повышения уровня) [25, 234].

Определение фильтрационных параметров с учетом упругого режима пласта и аккумулирующей способности скважин производится по сложной методике, которая еще недостаточно разработана. С этим вопросом можно ознакомиться в специальной литературе [32].

Использование рассмотренных в данном параграфе решений представляет некоторые трудности, поэтому на вопросах практического применения этих решений остановимся в следующем параграфе.

§ 6-8. Обработка результатов опытов по испытанию скважин при неустановившейся фильтрации

Организация и проведение опытов по определению фильтрационных характеристик пласта осуществляется в соответствии со специальными правилами, которые приводятся во многих руководствах и инструкциях [32, 206 и др.]. Отчет о таких испытаниях составляется по определенной форме, он должен содержать сведения об устройстве опытной скважины (или скважин), о количестве и расположении наблюдательных скважин, о геологии, об условиях проведения опыта и о замеренных во время опыта величинах.

Результаты опытов по испытанию скважины обычно бывают представлены сведениями о значениях расхода опробуемой скважины и наблюдаемых при этом понижениях.

При расчетах фильтрационных характеристик пласта по результатам наблюдений в период неустановившегося движения для облегчения анализа экспериментальных данных желательно откачку (нагнетание) проводить в определенном режиме с постоянным дебитом или при постоянном понижении.

При неоднократных замерах дебита и понижения следует прежде всего построить графики зависимости $Q=f(t)$ или $S=f(t)$, а в случаях проведения опытов при одновременном изменении Q и S — оба названных графика, причем графики $S=f(t)$ строятся для всех наблюдательных точек.

При наличии некоторого разброса точек, характерного для натурных условий, результаты приходится осреднять так, чтобы искомая кривая была достаточно плавной. Пример такого осреднения приведен на рис. 6-7. Экспериментальные точки должны располагаться по обе стороны от идеализированной кривой, по которой в дальнейшем определяются расчетные параметры. Далее выбирается расчетная зависимость, наиболее отвечающая условиям проведения опыта.

Выбор этой зависимости прежде всего определяется расчетной схемой, принятой для описания процесса испытания. Некоторые соображения по поводу принципов выбора расчетной схемы приводятся в следующем параграфе.

При общих равных условиях оценку фильтрационных параметров пласта предпочтительно проводить по показаниям наблюдательных скважин, используя данные о поведении центральной (испытуемой) скважины только с целью корректировки полученных решений. При этом по результатам опытов можно оценить фильтрационное сопротивление опытной скважины [25].

Из приведенных в § 6-7 данных следует, что при заданной расчетной схеме способ расчета определяется характером ре-

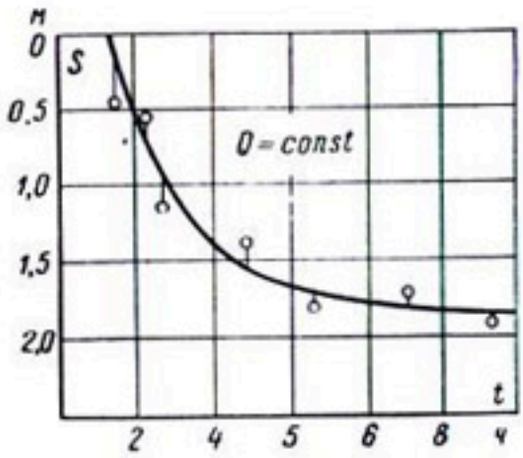


Рис. 6-7. Пример построения расчетной кривой $S=f(t)$ по данным натурных наблюдений при откачке с постоянным дебитом.

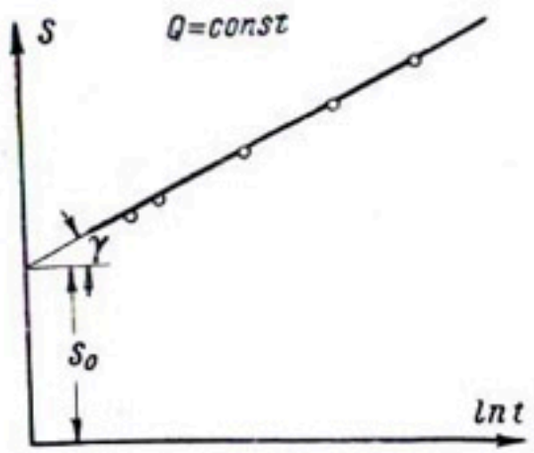


Рис. 6-8. Зависимость понижения уровня воды в скважине от времени откачки (нагнетания).

жима неустановившейся фильтрации, который, в зависимости от специальных критериальных величин, может быть классифицирован как неупорядоченный и квазистационарный.

Заранее точно установить характер фильтрации нельзя, поэтому для его выяснения целесообразно провести расчет сперва по уравнениям квазистационарной фильтрации, а затем по величине параметра u или фильтрационного сопротивления $\Phi(u)$ оценить приемлемость принятой методики расчета.

Другой прием анализа режима фильтрации связан с графической интерпретацией результатов экспериментов. При использовании этого способа надо построить график зависимости $S=f(\ln t)$ при откачках с постоянным дебитом (рис. 6-8) и $Q=f(\ln t)$ при откачках с постоянным понижением. При этом, как явствует из основных уравнений квазистационарной фильтрации:

$$k = \frac{Q}{4\pi T\,(S_2 - S_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \qquad (6\text{-}39)$$

и
$$k = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi T S_0 (Q_1 - Q_2)} \ln \frac{t_2}{t_1}, \qquad (6\text{-}40)$$

приведенных в главе 5, между S и $\ln t$ или между $1/Q$ и $\ln t$ существует линейная зависимость. Наличие такой зависимости свидетельствует об установлении режима квазистационарной фильтрации. Продолжая прямолинейную часть графика рис. 6-8 до пересечения с осью ординат, можно найти начальную ординату S_0 и угловой коэффициент γ. Как следует из уравнений квазиустановившейся фильтрации, при $Q = \text{const}$

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{S_2 - S_1}{\ln \frac{t_2}{t_1}} = \frac{Q}{4\pi kT}, \qquad (6\text{-}41)$$

$$S_0 = \operatorname{tg}\gamma \ln \frac{2{,}25a}{r^2}. \qquad (6\text{-}42)$$

Начало координат отвечает значению $t = 1$. Соответственно при $S = \text{const}$

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1 Q_2 \ln \frac{t_2}{t_1}} = \frac{1}{4\pi kTS_0}. \qquad (6\text{-}43)$$

Из приведенных формул можно найти a и k.

Способ графоаналитического решения особенно удобен при обработке большого количества экспериментальных данных.

Построение соответствующих графиков $S = f(t)$ при $Q = \text{const}$ для наблюдательных скважин аналогично подобному построению для центральной скважины. Тем не менее вид этих кривых имеет отличительные особенности. Поскольку возмущения потока, вызванные откачкой или нагнетанием, распространяются от источника возмущения постепенно, то изменение уровня в наблюдательных скважинах запаздывает по сравнению с изменением уровня в центральной. Запаздывание это выражается тем сильнее, чем дальше отстоит наблюдательная скважина от центральной.

В тех случаях, когда в результате проведенного анализа выясняется, что во время испытания имел место неупорядоченный режим, методика расчета изменяется.

Как уже отмечалось в предыдущем параграфе, определение искомого параметра u из уравнения (6-24) осуществляется методом последовательных приближений. При этом Н. Н. Веригин предлагает следующую последовательность операций [32]. Для заданных значений l/T и T/r по произвольно назначенным трем значениям u_1 с помощью графиков, общий вид которых приводится на рис. 6-9, определяются соответствующие значения $\Phi(u_1)$. Затем вычисляются три значения $u_2 = u_1 \frac{t_1}{t_2}$, соответствующие ранее выбранным u_1, и по тому же графику устанав-

ливаются значения $\Phi(u_2)$. Для каждой найденной пары $\Phi(u_1)$ и $\Phi(u_2)$ определяется отношение $\Phi(u_1)/\Phi(u_2)$ и строится график $\frac{\Phi(u_1)}{\Phi(u_2)} = f(u_1)$, пример которого приводится на рис. 6-10. По заданному из опыта отношению S_1/S_2 или Q_2/Q_1 можно установить значение искомого параметра u_1, а с помощью u_1 найти a. Искомое значение k можно найти, определив $\Phi(u_1)$ по графику $\Phi(u) = f(u)$. При определении фильтрационных характеристик по показаниям наблюдательных скважин в случае откачек при постоянном понижении вместо Q_1 и Q_2 рассматриваются удельные дебиты.

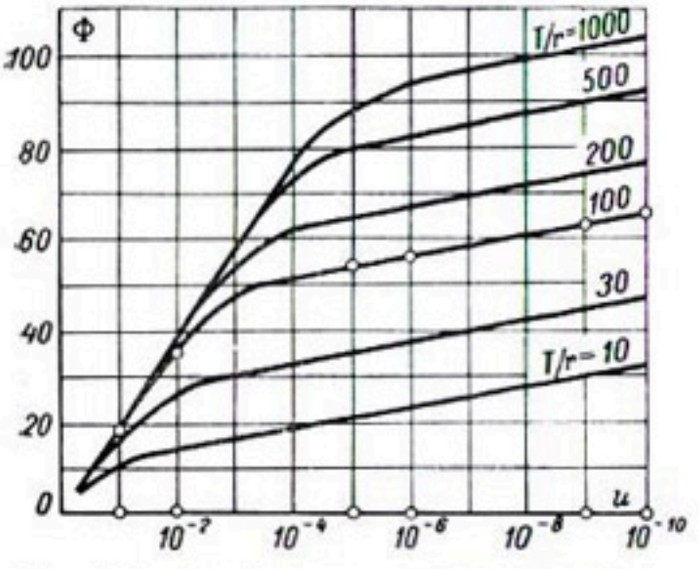


Рис. 6-9. График для определения фильтрационного сопротивления Ф по значению u при неустановившейся фильтрации.

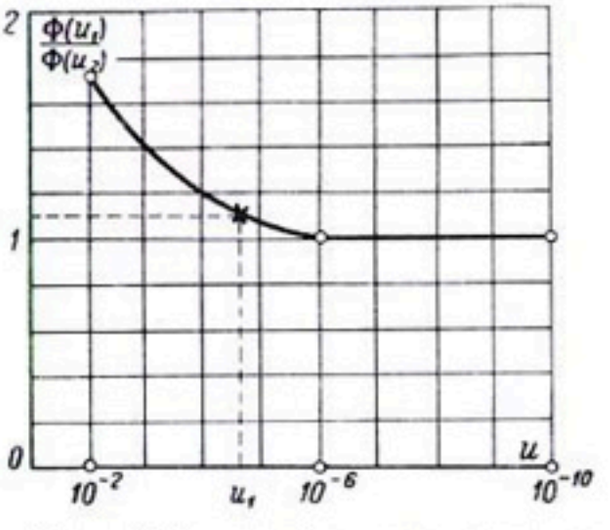


Рис. 6-10. График для расчета фильтрационного сопротивления по данным опыта.

В случае совершенных скважин и скважин в пластах неограниченной мощности все расчеты проводятся по таблицам функции Ei вместо $\Phi(u)$.

Довольно широкое применение для фильтрационного расчета в период неупорядоченного режима нашел также так называемый метод эталонной кривой [206]. Согласно этому методу, на прозрачной бумаге строится эталонная кривая зависимости $\ln[-\mathrm{Ei}(-u_0)] - \ln\frac{1}{u_0}$, и отдельно на другом планшете кривая $\ln S - \ln t$, полученная по экспериментальным данным. Затем обе кривые совмещаются. Искомые характеристики путем соответствующих вычислений определяются по данным об относительном смещении координатных осей как $\ln(Q/4\pi kT)$ и $\ln(r^2/4a)$ (рис. 6-11). Этот метод был разработан американскими учеными [206]. Теоретической основой его является сопоставление уравнений

$$S = \frac{Q}{4\pi kT}\Phi(u) \text{ и } u = \frac{r^2}{4at},$$

которые после логарифмирования и при условии, что $\Phi(u) = -\mathrm{Ei}(-u)$, можно привести к виду:

$$\ln S = \ln \frac{Q}{4\pi kT} + \ln[-\mathrm{Ei}(-u)] \qquad (6\text{-}44)$$

и

$$\ln t = \ln \frac{r^2}{4a} + \ln \frac{1}{u}. \qquad (6\text{-}45)$$

Изложенные способы обработки результатов натурных наблюдений в принципе применимы и в случае откачек с изменяющимся дебитом и понижением напора. Соответствующие расчетные формулы для откачек с различными законами изменения дебита приводятся в [25]. Практический интерес представляют

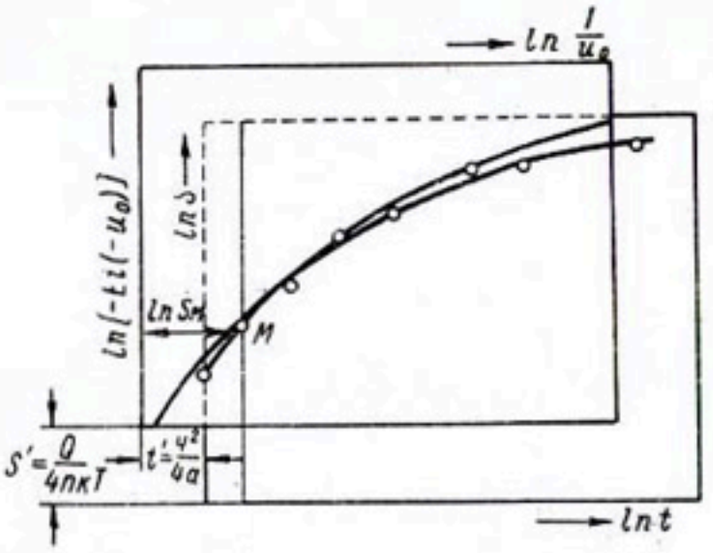


Рис. 6-11. Эталонная кривая для расчета фильтрационных характеристик пласта по опытным данным в период неустановившейся фильтрации.

также некоторые особенности методики определения гидрогеологических параметров по данным опытов с системами взаимодействующих скважин. Эти вопросы подробно излагаются в работах [24, 196].

§ 6-9. Общие замечания по практическому использованию уравнений упругого режима

Об отдельных затруднениях, возникающих на практике, в связи со схематизацией изучаемого процесса при определении фильтрационных характеристик пластов уже упоминалось в главе 5. Напомним, что там этот вопрос рассматривался только с точки зрения определения коэффициента фильтрации. Некоторые дополнения к изложенному можно сделать, исходя из опыта определения коэффицентов пьезо- и уровнепроводности, т. е. с позиции опытов со скважинами в условиях применения лишь уравнений упругого режима.

Схематизация условий залегания пласта и определение граничных условий, т. е. принятие схем пластов ограниченной или неограниченной мощности, общая оценка взаимодействия изучаемого пласта с пластами смежными проводятся в основном так же, как и в случаях, рассмотренных в § 5-3. Иначе говоря,

к схемам пласта неограниченной мощности можно отнести все случаи, когда $l/T<0{,}1 \div 0{,}3$.

Граничные условия оцениваются по данным геологии изучаемого пласта, но они также могут быть в известной степени откорректированы и по графикам $S=f(\ln t)$, полученным в результате испытаний скважины. Влияние граничных условий может сказываться на форме краевых участков этих графиков. Анализ взаимосвязи между деформациями графиков $S=f(\ln t)$ и условиями на границах пласта проводится в ряде работ [15, 179, 181]. Для иллюстрации влияния граничных условий на рис. 6-12 приведен типовой график $S=f(\ln t)$ при откачках из скважин в различных водоносных горизонтах. Напомним, что при оконтуривании водоносного горизонта непроницаемыми границами нельзя добиться стабилизации уровня S при откачке с $Q=\text{const}$.

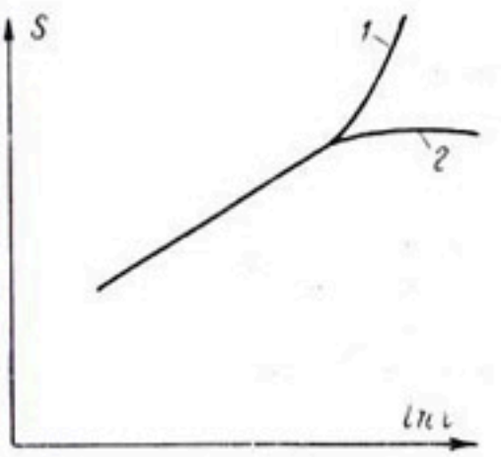


Рис. 6-12. Графическое изображение влияния граничных условий на зависимость $S=f(t)$.

1 — для пласта с непроницаемыми границами; *2* — для пласта с источником питания.

При наличии наблюдательных скважин в пласте, однородном в плане, для оценки фильтрационного сопротивления, обусловленного несовершенством опытной скважины, применима формула:

$$\Phi_0 = \frac{2\pi kTS_0}{Q} - \frac{1}{2}\,\mathrm{Ei}\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right), \qquad (6\text{-}46)$$

где S_0 — понижение в опытной скважине в момент времени t; a — коэффициент пьезопроводности, полученный в результате расчетов по показаниям наблюдательных скважин.

Приведем некоторые соображения по поводу выбора расчетной зависимости для определения фильтрационных характеристик пласта по данным об изменении уровня в скважине. В § 6-7 отмечалось, что в данном случае зависимости имеют приближенный характер, поскольку в них не учитывается аккумулирующая способность опытной скважины и пренебрегается изменением уровня, вызванным фиктивной откачкой после начала воображаемого нагнетания. Поскольку расчет с учетом аккумулирующей способности скважины технически весьма сложен, исследователи предпочитают использовать приближенные формулы расчета с соответствующей поправкой на емкость скважины. Э. Б. Чекалюк [25] для оценки погрешности расчета за счет пренебрежения аккумуляцией воды в опытной скважине предлагает следующий поправочный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{V(t)}{Qt}, \qquad (6\text{-}47)$$

где $V(t)$ — объем воды в скважине в момент t; Q — дебит скважины. С помощью этого коэффициента можно определить период работы скважины, в течение которого пренебрежение емкостью скважины вносит существенную ошибку в расчеты.

Кроме того, в [25] приводится способ учета нарушений идеальной зависимости кривой $S - \ln t$ по методике Ф. А. Требина и Г. В. Щербакова. Поправочный коэффициент по предложению этих авторов имеет вид:

$$\sigma = \frac{Q}{Q - q(t)}, \tag{6-48}$$

где Q — дебит скважины; $q(t)$ — составляющая общего расхода Q, обусловленная емкостью скважины и определяемая по формуле:

$$q(t) = \pi r_0^2 \frac{\Delta S}{\Delta t}, \tag{6-49}$$

где $\Delta S/\Delta t$ — скорость изменения уровня в скважине. Коэффициент σ используется для корректирования значений S, наблюдаемых в скважине, т. е. вместо S в расчетах принимается величина $S' = \sigma S$.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТА

§ 7-1. Общие сведения о фильтрационных деформациях грунта

Вода, фильтрующаяся в порах или трещинах горных пород, воздействует на них, изменяя структуру пористой или трещиноватой среды. Влияние фильтрационного потока на грунт обусловлено двумя основными причинами.

Во-первых, действием гидромеханического давления на частицы грунта, в результате чего мелкие частицы обычно независимо друг от друга перемещаются в порах или трещинах или же происходит совместное движение множества частиц, слагающих более крупные по сравнению с их размером объемы грунта.

Во-вторых, химическим воздействием, которое фильтрационный поток может оказывать на грунт, проявляющимся в выносе из грунта растворимых включений или в выпадении в порах в виде осадка растворенных в воде веществ.

Изменение порового пространства, происходящее в результате механического воздействия потока на грунт, возможно в двух направлениях. Так, вследствие выноса мелких частиц поровое пространство может увеличиваться. Такое действие потока на грунт называется механической суффозией [1].

Если принесенные потоком извне мелкие частицы грунта откладываются в данном объеме грунта, то указанный процесс называется кольматацией. Мы отнесли процесс кольматации к категории механических процессов, совершающихся под действием гидродинамического давления и трения. Однако в ряде случаев этот процесс осложняется. Так, например, при фильтрации глинистых суспензий происходит адсорбция глинистых частиц на поверхности мелких песчаных зерен грунта, и такие частицы прочно удерживаются в порах.

---

[1] Термин «суффозия», который буквально означает подкоп, размыв, введен в литературу А. П. Павловым [124].

Следует отметить также, что при увеличении градиентов напора в области фильтрации силы гидродинамического давления могут превалировать над адсорбционными силами. Тогда адсорбированные частицы срываются с поверхностей песчаных зерен и происходит вынос частиц грунта из пор, т. е. механическая суффозия.

Понятно, что в результате механической суффозии коэффициент фильтрации увеличивается, при кольматации — уменьшается.

Таким образом, оба названных вида деформаций грунта изменяют его гранулометрический состав и фильтрационные свойства. Процессы механической суффозии и кольматации объединяются общими физическими закономерностями, и обычно в широком смысле эти процессы происходят совместно. Так, в некоторых зонах области фильтрации происходит механическая суффозия, причем мелкие частицы грунта вымываются фильтрационным потоком. В других зонах те же частицы останавливаются и происходит кольматация.

Совместное движение множества частиц может происходить под действием гидромеханического давления потока на некоторый объем грунта. Такая деформация грунта называется выпором. Выпор может возникнуть в месте выхода грунтового потока из-под плотины в нижний бьеф, особенно при наличии верхнего слабоводопроницаемого пласта. При этом в зоне выпора возрастают градиенты напора, что обусловливает наличие большой удельной (приходящейся на единицу объема грунта) силы гидродинамического давления. Грунт разрыхляется, т. е. увеличиваются размеры его пор, и, следовательно, увеличивается пористость. Имеются некоторые разновидности фильтрационных деформаций, определяемые граничными условиями или совместным существованием выпора и суффозии.

Растворение и вынос из грунта содержащихся в нем растворимых в воде соединений называется химической суффозией. В результате химической суффозии происходит увеличение порового пространства и соответственное увеличение коэффициента фильтрации. Если содержащиеся в грунтовой воде растворимые соединения выпадают в грунте в виде осадка, закупоривая поры или трещины, то такой процесс можно назвать химической кольматацией.

В гидротехнической практике наблюдается также так называемая биологическая кольматация. Это — процесс отложения в грунте осадков, вызванных деятельностью живых организмов.

Фильтрационные деформации грунта[1] играют исключительную роль в гидротехнической практике. Большинство аварий и разрушений гидротехнических сооружений в той или иной степени связано с развитием фильтрационных деформаций. Но

[1] Этот термин предложен С. В. Избашем [65].

эти деформации происходят обычно в недоступных для прямого наблюдения областях основания или сооружения и, будучи часто связанными с невыявленными местными неоднородностями грунта, носят иногда случайный характер. Поэтому натурные исследования фильтрационных деформаций в периоды строительства и эксплуатации гидросооружений имеют первостепенное значение.

Различаются безопасные и опасные фильтрационные деформации [184]. Первые обычно всегда наблюдаются в грунтовых массивах, в которых происходит фильтрация, и особенно часто встречаются в начальный период эксплуатации сооружений. Вторые возникают только при определенных неблагоприятных условиях и могут привести к разрушению. Способность грунта сопротивляться опасным фильтрационным деформациям называется фильтрационной прочностью грунта.

В некоторых случаях фильтрационные деформации грунта являются полезными, например, вымыв некоторого количества мелких частиц из пор грунта вокруг скважины или при очистке обратных фильтров. Что касается кольматации, то она зачастую производится даже искусственно с целью уменьшения фильтрации из водохранилищ и каналов, а также с целью создания кольматационных понуров плотин. Поэтому задачей натурных исследований фильтрационных деформаций является установление степени опасности их и управление процессами суффозии и кольматации, т. е. в конечном счете определение мероприятий, влияющих на интенсивность развития деформаций.

§ 7-2. Основные способы исследований фильтрационных деформаций грунта

Из приведенного выше определения фильтрационных деформаций грунта следует, что представление об этих деформациях неразрывно связано с фильтрационным потоком, причем все изменения структуры грунта немедленно отражаются на характере фильтрационного потока. В самом деле, если под действием фильтрационного потока происходят изменения объема грунта, а следовательно, и пористого пространства, то эти изменения немедленно приводят к изменению площади живых сечений поровых каналов, к изменению фильтрационного сопротивления, а следовательно, и к изменению скорости потока. Отсюда вытекает, что наблюдения за фильтрационными деформациями грунта принципиально могут осуществляться по двум направлениям: путем контроля плотности пористой среды и путем определения основных характеристик фильтрационного потока.

Наблюдения за состоянием грунта осуществляются по данным о пористости (или трещиноватости) и о гранулометрическом составе грунта. Эти методы контроля часто оказываются недостаточно чувствительными и по точности обычно уступают

чисто фильтрационным методам исследования. Такое положение нетрудно объяснить, если вспомнить, что в подавляющем большинстве случаев пористость грунта, а тем более активная пористость бывают существенно меньше 0,5. Поэтому одно и то же изменение объема пористой среды сказывается по-разному на изменениях объема твердой среды и порового пространства. Особенно наглядно указанное обстоятельство можно пояснить на примере трещиноватой породы, когда трещиноватость составляет 1—2% от общего объема. Отсюда следует, что изменение доли грунтового скелета и заполнителя грунта на 2—3% вызывает изменение объема порового пространства в 1,5—2 раза.

Если к сказанному еще добавить, что организация наблюдений непосредственно за состоянием грунта в целом несколько сложнее, чем организация наблюдений за фильтрационным потоком, то становится понятным, почему фильтрационные исследования для целей контроля фильтрационных деформаций имеют такое большое распространение. При этом наблюдения охватывают определение пьезометрических напоров и скоростей фильтрации, определение содержания взвесей в фильтрационном потоке и определение химического состава воды. Естественно, что методика определения пьезометрических напоров и скоростей фильтрации практически ничем не отличается от подобных определений с целью изучения только фильтрационного режима. В этом отношении можно лишь добавить, что при определении скорости движения воды в порах скорость, определяемая методом наблюдательных скважин или по данным о скорости фильтрации и пористости, оказывается ниже средней скорости в порах из-за извилистости поровых каналов. Названное обстоятельство следует учитывать при анализе процессов суффозии в натурных условиях.

Что касается определения содержания взвесей в воде и ее химического состава, то эти вопросы уже целиком составляют специфику исследований процессов суффозии и кольматации и заслуживают особого внимания. В данном отношении на натурные наблюдения падает особенно большая ответственность, так как методика прогнозирования процессов суффозии и кольматации до сих пор развита мало. Отдельные работы по этим вопросам [31, 122, 138 и др.] еще не дали достаточного материала для теоретической оценки интенсивности развития процессов суффозии. Результаты опытов, проводимых в лаборатории, не могут быть распространены на натурные условия, поскольку при сопоставлении имеющихся лабораторных данных с натурными обнаруживается большое несоответствие.

Механическая суффозия изучается обычно по наблюдениям за участками выхода грунтовых вод в нижний бьеф на откосы и в дренажные устройства. При этом по возможности измеряется фильтрационный расход — общий и по отдельным уча-

сткам или по отдельным сосредоточенным источникам. В ряде случаев возможно исследовать количественно вынос грунта из земляного сооружения. На рис. 7-1 показаны графики интенсивности выноса мелких фракций на различных участках земляной плотины Горьковской ГЭС. Как видно из графиков, закон изменения интенсивности выноса на различных участках разли-

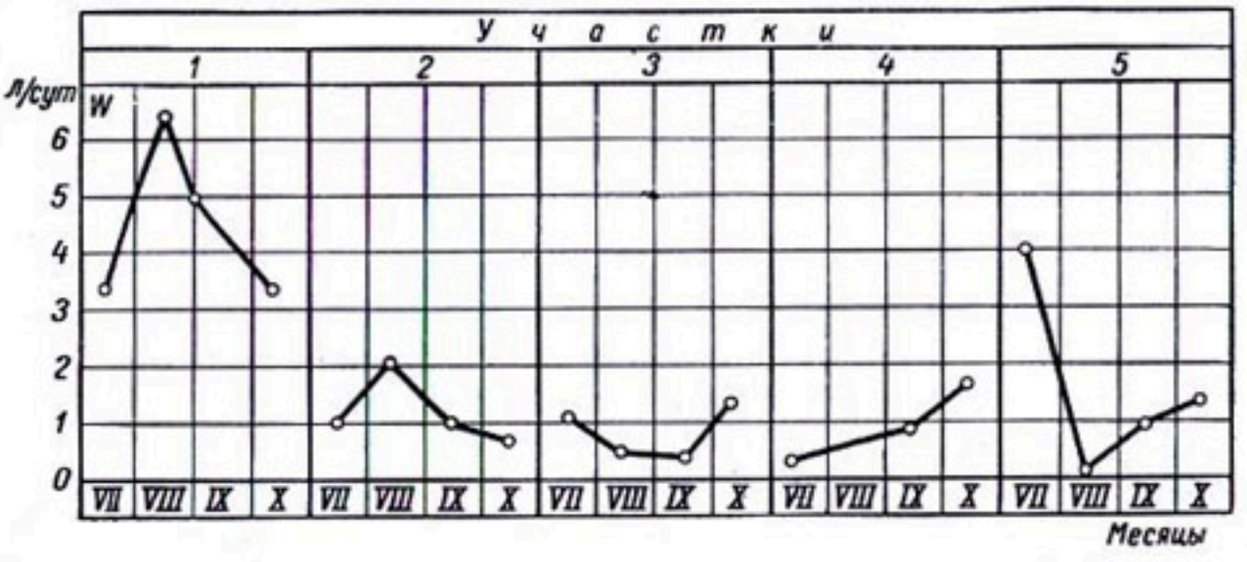


Рис. 7-1. Графики интенсивности выноса песка w на участках *1—5* дренажа.

чен. Так, на участках *1* и *2* максимальная интенсивность выноса наблюдалась в середине августа, а на участке *5* в это время была отмечена минимальная интенсивность выноса.

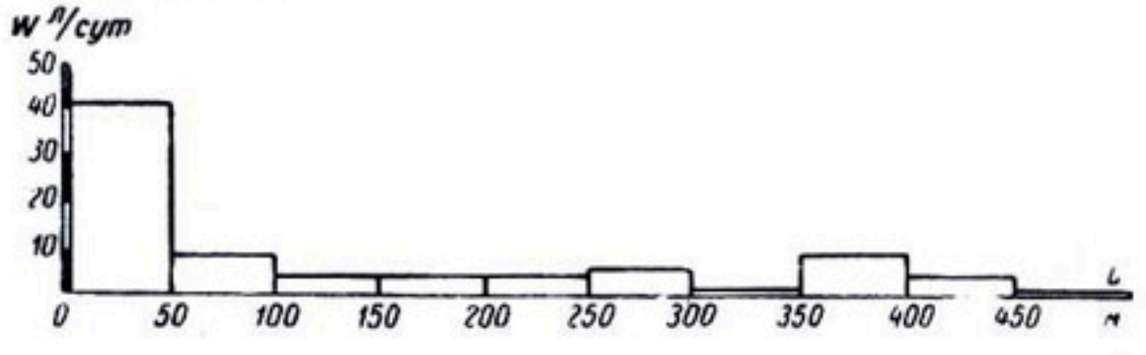


Рис. 7-2. График интенсивности выноса песка w из дренажных труб по длине L плотины.

На рис. 7-2 дан график средних значений интенсивности выноса частиц грунта в дренаже того же объекта. График дает наглядное представление о развитии суффозионных явлений по длине плотины.

При исследованиях суффозии берутся пробы для анализа выносимого водой грунта. Для исследования состояния обратных фильтров (в случае их доступности) берутся пробы грунта перед фильтром и из слоев фильтра при помощи буровых скважин или из шурфов.

При исследовании химической суффозии производятся те же наблюдения, но берутся пробы воды на химический анализ. Так

как химическая суффозия обычно не имеет локального характера, как механическая суффозия, а захватывает большие зоны в основаниях гидросооружений, то наблюдения за ней распространяются по возможности на все основание сооружения. Поэтому пробы воды на химический анализ берутся из пьезометров, поставленных в различных точках оснований. Весьма существенную роль играют наблюдения за изменениями пьезометрических напоров.

Кольматация грунта обычно носит зональный характер. В основном кольматация происходит на поверхностях входа воды в грунтовый массив, т. е. на поверхностях дна и откосов водохранилищ, каналов и на верховых откосах земляных плотин. При неудачном расчете или при небрежном производстве работ кольматации могут подвергаться обратные фильтры дренажей. Отсюда вытекает, что и наблюдения за процессом кольматации должны быть сосредоточены в указанных местах. В состав этих наблюдений входят наблюдения за пьезометрами, поставленными по течению выше и ниже зоны кольматации, а также непосредственно близ первого слоя обратного фильтра. Хорошую информацию о процессе кольматации дают наблюдения за фильтрационным расходом. В § 8-4 описан случай наблюдения за расходом кольматировавшейся перемычки, который дал исчерпывающее представление об эффекте кольматации.

Выпор грунта характеризуется наличием больших градиентов напора в зоне, подвергаемой выпору.

Для определения градиентов напора необходимо иметь наблюдения за показаниями пьезометров в зонах выпора. Нередко в зонах выпора при восходящем потоке, например в строительных котлованах, наблюдается образование ключей. Ввиду взвешивания фильтрационным потоком грунт разрыхляется и образуются трясины в которых, как наблюдалось в практике строительства, тонут тяжелые предметы.

Ключи, являющиеся признаком выпора [69], образуются также в нижних бьефах гидротехнических сооружений.

Интересно отметить, что, как показывают исследования американских ученых [229], из 204 случаев разрушения земляных плотин нет ни одного случая разрушения вследствие выпора.

§ 7-3. Наблюдения за состоянием грунта

Непосредственные наблюдения за состоянием грунта включают наблюдения за плотностью и гранулометрическим составом грунта, за пористостью и за осадками.

Определения гранулометрического состава грунта проводятся по результатам лабораторного анализа проб, отобранных из исследуемого пласта. Определения плотности и пористости грунта могут проводиться как по результатам изучения отдель-

ных проб в лабораторных условиях, так и путем определения искомых характеристик в натурных условиях [155].

Методика отбора проб для изучения гранулометрического состава, структуры грунта и других физико-механических характеристик, так же как в случае отбора проб для определения водоотдачи пласта (глава 6), происходит по определенным правилам, цель которых — обеспечить максимальное соответствие выбранного образца изучаемому пласту. Способы отбора проб, методика проведения лабораторных исследований и методы расчета характеризующих пласт показателей, по данным о результатах изучения отдельных проб, приводятся во многих руководствах [27, 76, 133, 142, 153]. Определение характеристик пласта по результатам лабораторного опробования отдельных образцов грунта имеет ограниченную применимость, поскольку подобный метод исследования связан с неизбежным нарушением целостности пласта. Ввиду этого на практике метод отбора проб часто стремятся заменить неразрушающими методами контроля, такими, как ультразвук, метод нейтронного и гамма-каротажа и другие. Эти методы исследования, в целом весьма перспективные, до сих пор еще не нашли широкого применения ввиду их относительной сложности и новизны используемой аппаратуры. Сведения о методике исследований и примеры применения этой методики в конкретных условиях приводятся во многих работах [138, 207].

В противоположность рассмотренным исследованиям структуры грунта вопросы контроля осадок хорошо разработаны [175]. Осадки грунта, а также вспучивание во многих случаях могут быть одним из наиболее общих и очевидных показателей фильтрационных деформаций. Правильной организации наблюдений за осадками на практике придается очень большое значение. Сведения об осадках позволяют также оценивать и прочностные характеристики грунта. Наблюдения за деформациями пласта, откосов, оснований сооружений и т. д. могут проводиться визуально или с помощью указателей — марок, жестко связанных со специальными плитами. Эти плиты устанавливаются в толще грунта более или менее близко к грунтовой поверхности. Высотное положение марок нивелируется, а затем систематически проверяется путем нивелирования. Класс точности нивелировок определяется важностью объекта. Правила нивелирования, а также сведения о методах перехода от показаний отдельных точек к осредненным величинам имеются в некоторых работах [175, 225].

На гидротехнических сооружениях наблюдения ведутся за осадками оснований сооружений (глубинные марки) и за осадками самих земляных сооружений, например, тела плотин (поверхностные марки). Размещаются марки так, чтобы можно было судить о распределении осадок по фронту сооружения. При этом трудно бывает различить осадки, являющиеся

следствием фильтрационных деформаций, и осадки в результате нагрузки от веса сооружения. Материалы наблюдений за осадками обычно представляют в виде графиков изменения осадок

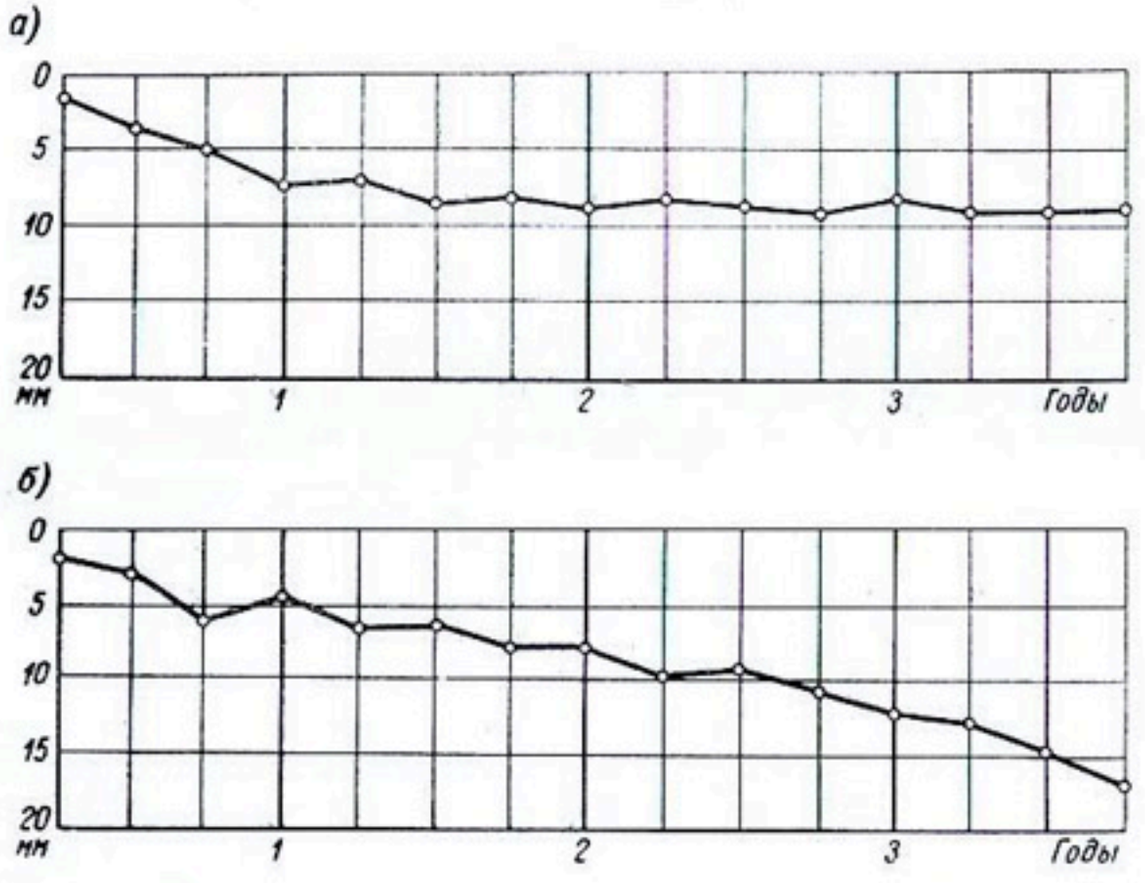


Рис. 7-3. Типовые графики осадок сооружения: *а* — стабилизированные осадки; *б* — прогрессирующие осадки.

с течением времени. Примерный вид графика осадок приведен на рис. 7-3. Анализируя материалы наблюдений, важно установить общую направленность осадок. В случае, когда с течением

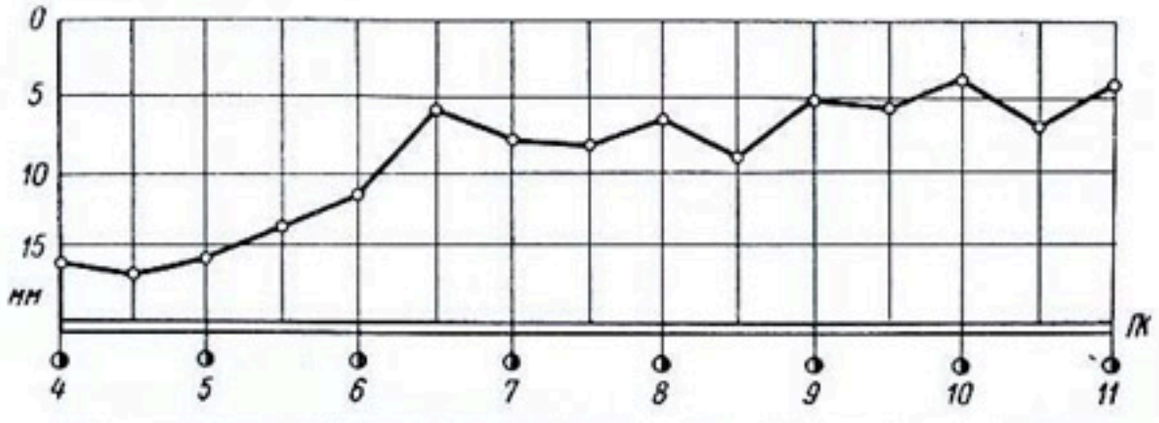


Рис. 7-4. Типовой график распределения осадок вдоль фронта сооружения.

времени осадки меняются мало и кривая зависимости $\Delta S = f(t)$ стремится к асимптоте, параллельной оси абсцисс, такие деформации считаются установившимися (рис. 7-3, *а*). Очевидно, что прогрессирующих фильтрационных деформаций нет, и осадка

определяется внешней нагрузкой. Иной вывод можно сделать в случаях, когда на графике $\Delta S = f(t)$ отмечаются прогрессирующие осадки (рис. 7-3, *б*). Это обстоятельство заставляет предполагать наличие фильтрационных деформаций.

Сравнительную характеристику прочностных свойств грунта можно получить при анализе графика распределения осадок по фронту сооружения, как это представлено на рис. 7-4. Такое представление осадок позволяет определить местоположение наименее благополучных участков, с тем чтобы в дальнейшем осуществлять на этих участках более тщательный контроль, а в случае необходимости заложить также и дополнительные марки.

§ 7-4. Исследование механической суффозии

Как уже отмечалось выше, механическая суффозия представляет собой процесс перемещения и выноса фильтрационным потоком частиц грунта. Обычно явления механической суффозии возникают и развиваются в несвязных грунтах, применительно к которым и разрабатываются все методы анализа. Вместе с тем на практике нередки также случаи развития механической суффозии в трещиноватых грунтах, когда в трещинах имеются мелкозернистые заполнители. Поскольку методы анализа механической суффозии в несвязных грунтах в значительной степени применимы и к данному случаю, то, не оговаривая этого особо, будем считать, что излагаемые ниже способы исследования механической суффозии могут быть в основном распространены и на трещиноватые породы.

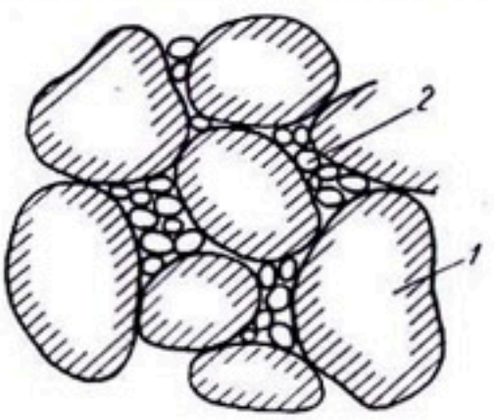


Рис. 7-5. Схема структуры грунта.

1 — частицы, образующие скелет грунта; *2* — заполнитель.

В соответствии с принятым определением [68] грунт, в котором в случае превышения скоростью фильтрации некоторого критического значения может возникнуть механическая суффозия, называют суффозионным. Соответственно несуффозионным называется грунт, в котором перемещения и вынос частиц под действием фильтрационного потока вообще невозможны.

Используя несколько идеализированные представления об укладке частиц несвязного грунта, в грунтовом теле можно выделить скелет, образованный частицами, передающими усилия, приложенные к грунту, и заполнитель — мелкие частицы, заполняющие поры или трещины и не участвующие в передаче нагрузки. Схематическое изображение грунта, соответствующее приведенному описанию, представлено на рис. 7-5. В зависимости от положения зоны, подвергшейся выносу частиц, различают

внутреннюю и внешнюю суффозии [184]. В первом случае имеется в виду процесс переноса частиц потоком внутри грунта, а во втором — вынос частиц из грунта. Кроме того, можно выделить суффозию, возникающую на границе слоев, различных по своему гранулометрическому составу (контактная суффозия) Одной из разновидностей таких явлений можно считать просыпание грунта в фильтр и размыв мелкозернистого грунта на границе с крупнозернистым под действием составляющей скорости фильтрации, направленной вдоль этой границы. Возникновение и развитие явлений механической суффозии в грунте можно представить себе следующим образом. При определенном значении скорости фильтрации частицы заполнителя под действием фильтрационного потока могут прийти в движение. Если позволяют размеры поровых каналов, такие частицы могут транспортироваться потоком из одного места в другое. По мере освобождения порового пространства водопроницаемость грунта увеличивается. При определенных условиях вынос частиц может распространиться на частицы скелета грунта, что приведет к деформациям.

Указанный механизм механической суффозии позволяет использовать для оценки суффозионных свойств изучаемых грунтов некоторые количественные критерии. Из изложенного выше следует, что возникновение механической суффозии возможно только при условии, что размер частиц заполнителя меньше размера порового канала. В случае шаровых частиц и канала круглого сечения это условие можно характеризовать неравенством:

$$d_{зап} \leqslant d_{п}, \tag{7-1}$$

где $d_{зап}$ — диаметр частицы заполнителя; $d_{п}$ — диаметр порового канала.

Между размерами пор и размерами поровых частиц, слагающих пористую среду, существует определенная связь. Очевидно, по данным о гранулометрическом составе можно в какой-то степени судить о величине поровых каналов. Попытки дать аналитическое выражение этой зависимости на основании строгих теоретических выводов не раз предпринимались многими исследователями [205], но до сих пор удовлетворительно решить этот вопрос еще не удалось. Поэтому критериальные расчетные зависимости, рекомендуемые разными авторами для определения степени суффозионности грунта, являются чисто эмпирическими.

В настоящее время имеется несколько зависимостей для расчета состава типового несуффозионного грунта [68, 92]. Разработаны способы графического и теоретического анализа степени суффозионности грунтов.

В натурных условиях для определения суффозионной характеристики исследуемого грунта можно проводить специальный

отбор проб. Затем, используя тот или иной критерий суффозионности, по данным результатов механического анализа проб грунта изучаемого слоя можно определить суффозионные характеристики грунта. Такая методика определяет комбинированный лабораторно-полевой способ исследования механической суффозии. Следует, однако, подчеркнуть, что если в несуффозионном грунте механическая суффозия не происходит даже при больших значениях градиента напора, то в грунтах суффозионных она происходит при том условии, что градиенты напора I будут выше критических $I_{кр}$. Под критическим градиентом понимается такой градиент, при котором возникает движение мелких частиц.

Таким образом, в применении к суффозионным грунтам возник механический критерий суффозии: $I \geqslant I_{кр}$. Приближенные значения $I_{кр}$ впервые встречаются в работах А. Н. Патрашева. Однако если принять во внимание, что наряду с геометрическими и механическими параметрами, входящими в этот критерий при суффозии и кольматации, играют роль и физико-химические факторы [99, 190], то понятно, что достаточно надежные значения для $I_{кр}$ можно получить только посредством экспериментальных исследований в лабораторных и в натурных условиях.

Другим методом изучения механической суффозии в натурных условиях является контроль развития процесса по данным о содержании взвесей в пробах воды, отобранной из пьезометра. Такой отбор должен производиться систематически по заранее составленной программе. В настоящее время методика отбора проб для контроля процесса механической суффозии практически не разработана. Обычно при исследованиях довольствуются обнаруживанием только самого факта выноса частиц, а количественный анализ представляет скорее академический интерес, чем дает исходный материал для надежного критерия размеров выноса.

Иногда попытку количественной оценки размеров выноса делают с помощью специальных песколовок в виде скважин или колодцев, устроенных на пути потока. Интенсивность выноса частиц определяется по интенсивности наносообразования на дне. В задачи исследований входит определение зависимости интенсивности выноса от времени. Могут быть построены кривые выноса. Примерный вид таких кривых приводится на рис. 7-1 и 7-2. Иногда для большей наглядности зоны выноса наносят на план сооружения. К таким исследованиям тесно примыкают наблюдения за состоянием дренажных систем, которые подробнее будут рассмотрены в следующем параграфе.

В последнее время предпринимаются попытки изучения процессов выноса частиц методом индикаторов. Эти исследования основаны на введении в грунт меченых частиц грунта [220]. Так, например, интересные опыты с активизированным песком были проведены В. М. Запорожцем [62]. Перемещение меченых частиц

в опытах фиксируется с помощью специальных измерительных приборов. Такой метод исследования, по-видимому, довольно перспективный, но до сих пор он еще недостаточно разработан.

§ 7-5. Натурные исследования кольматации грунтов гидросооружений и их оснований

Под кольматацией в практике гидротехнического строительства понимают различные явления; прежде всего отложение на дне и бортах водохранилищ, откосах каналов, на верховых откосах земляных плотин и т. д. слоя, состоящего из мелких песчаных или глинистых частиц. Коэффициент фильтрации такого слоя достаточно мал по сравнению с коэффициентом фильтрации пород, подстилающих кольматационный слой. При образовании кольматационного слоя коэффициент фильтрации подстилающих пород не изменяется, так как мелкие частицы проникают в поры или трещины обычно на очень малую глубину. Такая кольматация имеет, следовательно, поверхностный характер. Наряду с этим при известных условиях аллювиальные отложения под влиянием фильтрационных сил могут проникать в глубь массива грунта. При этом коэффициент фильтрации закольматированной зоны значительно уменьшается.

Кольматация некоторых зон грунтового массива может возникать не только за счет частиц грунта, привносимых извне, но и за счет перемещения мелких частиц грунта данного массива при наличии больших градиентов напора и, конечно, определенного гранулометрического состава грунта.

При кольматации карстовых пустот и трещин в скальных породах, наряду с механическими процессами кольматации, иногда имеют место химические процессы. Растворимые соли при движении по карстам и трещинам при соответствующих условиях выпадают из раствора в трещинах и карстах, иногда целиком заполняя пустоты [209]. Вообще в естественных грунтах под влиянием фильтрации происходит в той или иной степени непрерывный процесс перемещения мелких частиц, причем в одних зонах возникает суффозия, а в других кольматация. Однако эти явления, если они происходят в толще основания и не делаются интенсивными, не имеют практического значения для сооружения.

Таким образом, процессы кольматации в широком смысле слова достаточно разнообразны. Кольматация пород происходит естественным и искусственным путями. Естественная кольматация проявляется часто в долинах рек в результате отложения в руслах рек наносов и проникания мелких частиц в толщу грунта вследствие фильтрации. В таких случаях естественный поток грунтовых вод в берегах рек не смыкается с уровнями воды в реках и связь между уровнями воды в реках и показаниями пьезометров, установленных в берегах, проявляется слабо.

Часто наблюдается естественная кольматация грунтов водохранилищ и верховых откосов земляных плотин. В озерах кольматационный слой бывает иногда настолько водоупорным, что фильтрация из них полностью отсутствует.

В ряде случаев естественная кольматация дает большой полезный эффект в отношении борьбы с фильтрацией из водохранилищ, каналов, фильтрацией через земляные плотины, строительные перемычки и т. д. Она уменьшает потери на фильтрацию, снижает кривые депрессии и противодавление в плотинах.

В других случаях кольматация — отрицательное явление: она уменьшает водопроницаемость обратных фильтров дренажей, пьезометров, уменьшает производительность береговых водозаборов вследствие кольматации русел рек и т. д. Для борьбы с нежелательными проявлениями кольматации разрабатываются соответствующие методы [169]. Свойство кольматации сильно уменьшать водопроницаемость пород стало использоваться в практике строительства гидротехнических сооружений путем активного управления процессами естественной или искусственной кольматации. Примеры эффективного уменьшения фильтрации в плотинах и перемычках, строившихся в СССР, начиная с 1932 г., приведены в [28]. Резкое уменьшение фильтрации вследствие кольматации было в перемычке Камгэсстроя (см. рис. 8-3), о чем подробнее будет сказано в § 8-3. Фильтрационный расход через названную перемычку после кольматации уменьшился в 5 раз. Кольматация тела и основания плотины Павловской ГЭС на р. Уфе дала возможность, отказавшись от устройства зуба, сократить срок строительства плотины на 1 год и сэкономить значительные средства. Существенное снижение кривой депрессии было достигнуто путем кольматации дна водохранилища у верхового откоса Гуантинской плотины на р. Юндинхе (КНР) [152].

С физической стороны процесс кольматации довольно сложен. Если поверхностная кольматация песчаного слоя вызвана более мелкими песчаными частицами, то ее можно объяснить чисто механическим процессом и геометрией порового пространства, проявляющимися в задержании мелких частиц в порах. Но при наличии мелких частиц грунта и кольматирующих его частиц между ними возникают физико-химические связи. Вокруг частиц песка вследствие электростатического притяжения и адсорбции (коллоидов и суспензий) образуются такие оболочки, которые взаимодействуют с частицами, содержащимися в фильтрующей воде.

Особенно сложно протекает процесс кольматации грунта глинистыми частицами, которые адсорбируются на поверхностях песчаных частиц, причем этот процесс определяется химико-минералогическим составом глинистых частиц [123, 190].

Контроль развития кольматации в натурных условиях проводится путем непосредственного взятия проб (§ 7-3) или по

данным о пьезометрических напорах и фильтрационных расходах.

Особое значение имеют показания пьезометров, размещение которых обеспечивает возможность определения градиентов напора на участках наиболее вероятной кольматации, например, в понурной части сооружения, перед обратным фильтром и т. д. Оценки характера происшедших изменений водопроницаемости могут проводиться путем опробования пласта с помощью специальных опытов со скважинами (откачек, нагнетаний), по данным о напорах в период установившегося движения и по результатам наблюдений в период неустановившейся фильтрации. В этом случае можно применять методику анализа показаний пьезометров, изложенную в главе 6, или использовать аналитические решения, приводимые в некоторых работах [168]. Кольматация фильтров скважин может контролироваться по показаниям наблюдательных скважин во время пробных откачек (нагнетаний).

Суммарный эффект кольматации ложа водохранилища на противодавление в гидросооружениях определяется на основании показаний пьезометров, установленных в верхнем конце понура. Исчерпывающими характеристиками противофильтрационной способности кольматационного слоя являются его толщина и коэффициент фильтрации. Однако эти характеристики представляются неопределенными, так как из лабораторных исследований вытекает, что кольматационный слой неоднороден в отношении водопроницаемости. Водопроницаемость кольматационного слоя, очевидно, определяется величиной k_c/δ, где k_c — средний коэффициент фильтрации слоя и δ — его средняя толщина.

Если имеются данные о напорах в некоторых точках области фильтрации, величину k_c/δ можно определить путем расчета или по методу ЭГДА. В последнем случае область кольматации моделируется в виде полосы с повышенным удельным сопротивлением. В опытах это сопротивление изменяется до тех пор, пока экспериментальные значения напоров в заданных точках не будут равны напорам, полученным из натурных наблюдений.

§ 7-6. Натурные исследования обратных фильтров дренажей

Дренажами называются устройства для захвата грунтовых вод с целью понижения уровней грунтового потока или понижения давления на гидротехнические сооружения. На рис. 7-6 показаны некоторые типы дренажей бетонных (*а* и *б*) и земляных (*в, г, д, е*) плотин.

Дренированная вода отводится через дренажные кюветы или по трубам. Так как дренажные устройства выполняются из сильно водопроницаемого грунта (каменная наброска) или из

труб, снабженных отверстиями, то для предохранения грунта основания или тела земляного сооружения в местах выхода грунтовых вод устраиваются обратные фильтры. Обратный фильтр представляет собой переходный слой между двумя сопряженными грунтами, выполняемый из специально подобранных грунтов, обычно песка, или из проницаемых материалов,

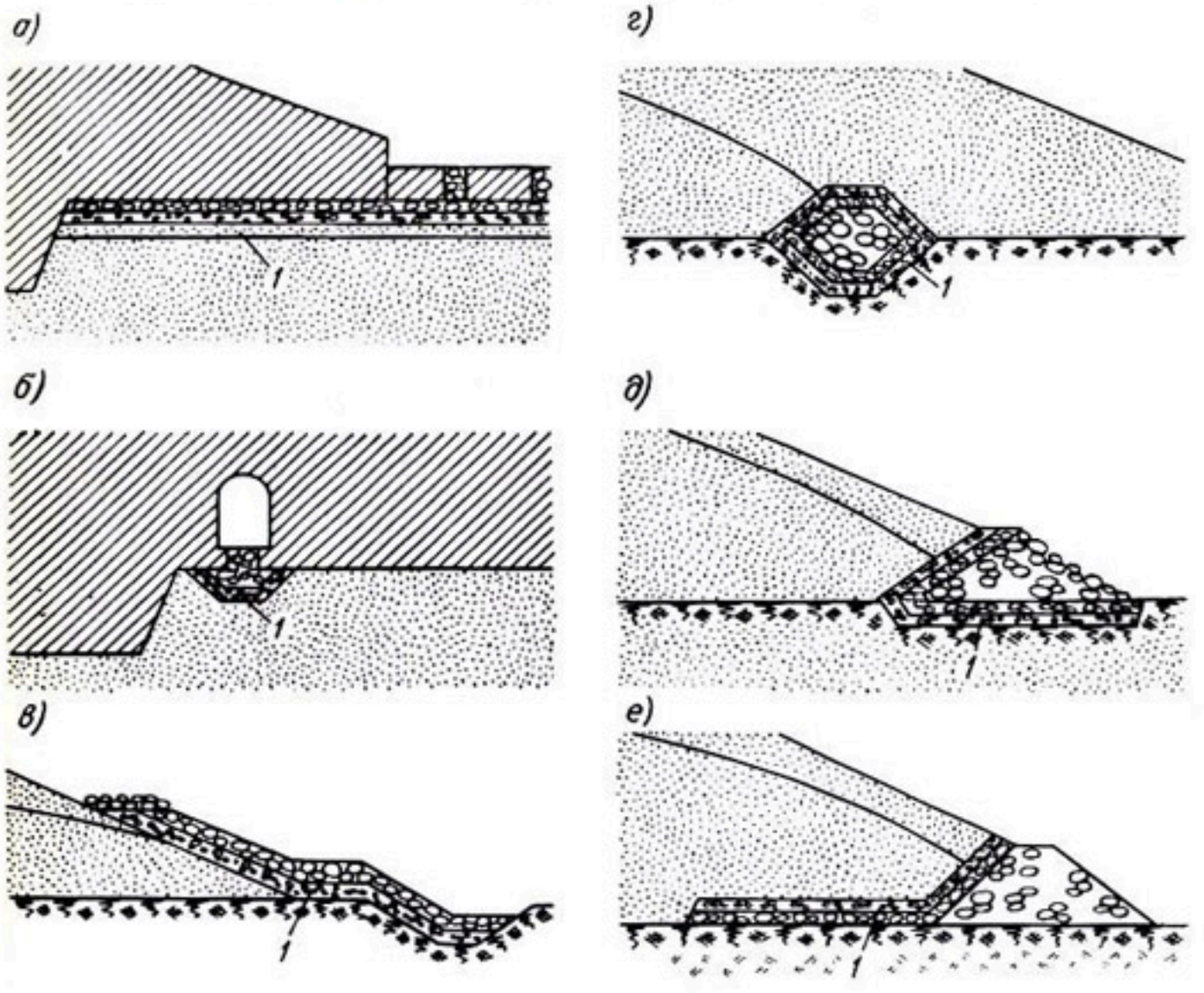


Рис. 7-6. Схемы типов дренажей плотин: *а* — горизонтальный плоский дренаж; *б* — горизонтальный дренаж с дренажной галереей; *в* — наклонный дренаж; *г* — горизонтальный внутренний дренаж; *д* — дренажная призма; *е* — горизонтальный плоский дренаж (дренажный тюфяк) с дренажной призмой. *1* — обратные фильтры.

например из пористого бетона. Обратные фильтры защищают грунт основания или земляного сооружения от внешней механической суффозии, т. е. выноса частиц из грунтового массива.

В практике наиболее употребительны обратные фильтры из несвязных грунтов; песчаных, гравийных и щебеночных. В зависимости от механического состава сопрягаемых грунтов обратные фильтры бывают однослойными и многослойными (обычно двух-или трехслойными).

Рациональному проектированию состава обратных фильтров посвящено много работ советских и иностранных ученых. Не

имея возможности останавливаться на существующих методах проектирования состава обратных фильтров, укажем только основные критерии этих методов:

1) коэффициент неоднородности, т. е. $\eta = d_{60}/d_{10}$, (или разнозернистости) слоев обратного фильтра, не должен превышать допустимого: $\eta \leqslant \eta_{доп}$;

2) междуслойный коэффициент, т. е. $\eta_м = D_j/d_i$, не должен превышать допустимого: $\eta_м \leqslant (\eta_м)_{доп}$. Здесь d_i — характерный расчетный размер зерен верхнего (по течению) слоя обратного фильтра или защищаемого грунта; D_j — характерный расчетный размер зерен нижнего (по течению) слоя обратного фильтра. Что касается размеров характерных зерен, то они так же, как и допустимые значения $\eta_м$, в различных методиках определяются различно. Напоминая, что индексы i и j обозначают процент зерен грунта по весу на кривой гранулометрического анализа (см. § 2-2), отметим, что по различным методикам [69], основанным на экспериментальных исследованиях, i принимается, например, равным 60, 40, 50 или же соответствующим диаметру сводообразующих частиц, т. е. частиц, образующих устойчивые своды над порами частиц нижнего слоя [68]. Имеются более сложные способы определения i в зависимости от коэффициента разнозернистости [67]. Аналогичное положение существует и в отношении D_j.

Во многих случаях проектирования гидросооружений оказывается, что стоимость обратных фильтров высока. Поэтому ряд работ посвящен исследованию возможности расширения области использования обратных фильтров грунтов с бóльшими значениями коэффициента разнозернистости, чем это было установлено в инструкциях 30-х годов, а также уточнению и расширению диапазона значений междуслойных коэффициентов.

Основываясь на современных методах механизированного строительства, были разработаны вопросы применения однослойных фильтров из естественных грунтов.

Теория проектирования обратных фильтров очень сложна, так как она должна учитывать движение твердых частиц грунта под действием гидродинамических сил в порах сложной формы. Кроме того, в ряде случаев значительную роль здесь могут играть физико-химические факторы, о чем было упомянуто в § 7-1.

Поэтому теория проектирования обратных фильтров основана на эмпирических данных, и расчетные зависимости имеют корреляционный характер. Естественно, что натурные исследования работы обратных фильтров имеют весьма важное значение не только для исследуемых сооружений, но и для дальнейшего усовершенствования методики проектирования обратных фильтров.

Первым литературным источником, содержащим материал по натурным исследованиям обратных фильтров, является книга

П. А. Шанкина [187], в которой кратко дается качественное описание работы обратных фильтров гидросооружений. В книге приводятся случаи неудовлетворительной работы обратных фильтров. В одних случаях наблюдалась суффозия в зоне расположения обратных фильтров, а в других случаях — их заиление. Однако эти недостатки в значительной части происходили от небрежного производства работ.

В 1956—1957 гг. Е. А. Лубочковым во ВНИИГ было проведено детальное исследование обратных фильтров гидротехнических сооружений Щербаковского и Цимлянского гидроузлов. Эти исследования качественного и количественного характера позволили сделать практические выводы о работе обратных фильтров.

Главными недостатками работы обратных фильтров является развитие суффозии защищаемого грунта и особенно кольматация (заиление) фильтров. Целый ряд обратных фильтров различных гидросооружений был обследован и изучен по состоянию в натуре и по различным материалам периода строительства. Имеется несколько примеров кольматации обратных фильтров. Почти все случаи кольматации объясняются условиями производства работ. В этом отношении, согласно материалам Е. А. Лубочкова, можно отметить случай неудовлетворительной укладки фильтра путем сбрасывания грунта из машин, в результате которой произошло расслоение обратного фильтра. В других случаях во время производства работ по намыву земляных плотин наблюдались прорывы воды из намывного прудка в трубчатый дренаж. При этом пылевато-глинистые частицы образовали небольшую прослойку на откосе слоя фильтра.

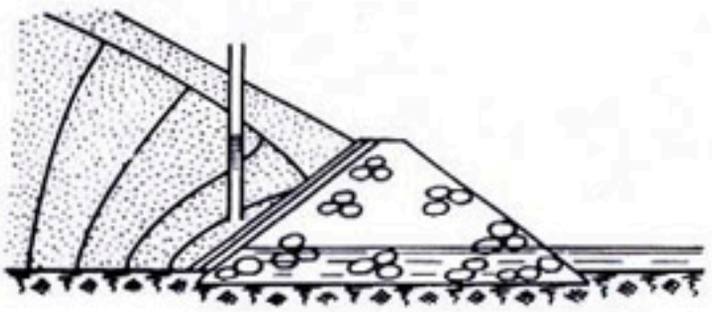


Рис. 7-7. Пьезометр в зоне обратного фильтра.

Остановимся на способах исследования работы обратных фильтров. Основным показателем заиления фильтра является повышение давления перед фильтром. В земляных плотинах при заилении фильтра наблюдается повышение кривой депрессии перед самым фильтром, о чем можно судить по показаниям пьезометров, установленных перед обратным фильтром (рис. 7-7).

В главе 9 приводятся различные случаи непредвиденного подъема кривых депрессии в земляных плотинах. Иногда определение причин такого повышения представляет затруднения. Типичным примером является повышение кривой депрессии в земляной плотине Каховского гидроузла [91].

Механическая суффозия обнаруживается по содержанию частиц грунта в воде, прошедшей сквозь обратный фильтр, и по

замеру вынесенных частиц, отложившихся в дренажном коллекторе. На рис. 7-1 и 7-2 показаны графики таких замеров в земляной плотине Горьковского гидроузла. Графики дают наглядное количественное представление о характере суффозии. В ряде случаев возможно получить образцы грунта близ обратного фильтра и самого фильтра земляных плотин и горизонтального дренажа территорий при помощи бурения или заложения шурфов. Образцы грунтов подвергаются гранулометрическому анализу и путем сравнения с составом ненарушенного грунта можно сделать заключение о составе вынесенных частиц и об интенсивности выноса. Характер кольматации обратных фильтров также может быть установлен в результате гранулометрического анализа грунта фильтра. О кольматации обратных фильтров вертикального дренажа можно судить по дебиту скважин, так как при наличии закольматированного слоя фильтрационное сопротивление скважины возрастает и дебит уменьшается. Обычно при очистке закольматированных фильтров, например, посредством дополнительной откачки из скважин дебит значительно возрастает.

Иногда, если грунтовая вода содержит растворимые вещества, происходит химическая кольматация фильтров. Такая кольматация редко возникает в фильтрах дренажей напорных гидросооружений, но иногда наблюдается в дренажных системах, осушающих территории. Для суждения об этом виде кольматации, связанном с физико-химическими процессами выпадения в фильтрах различных солей и коагуляции глинистых частиц, необходимо иметь данные о химическом составе грунтовой воды и химико-минералогическом составе грунтов. Тогда вопрос о химической кольматации может быть освещен при помощи специальных исследований.

Для исследования обратных фильтров немаловажное значение имеет ознакомление с документами строительного периода. Из них можно выяснить отступления от проекта, наличие при возведении сооружения аварий, влияющих на качество обратных фильтров, и т. д.

Следует иметь в виду, что обратные фильтры являются ответственным элементом сооружений и нарушение их нормальной работы зачастую вызывает нежелательное изменение нормального режима фильтрации.

§ 7-7. Исследование химической суффозии

Явления химической суффозии, т. е. процессы растворения и выщелачивания растворимых составляющих горных пород возникают как в условиях фильтрационного потока, так и в условиях бассейна грунтовых вод. В первом случае выщелачивание происходит вследствие непосредственного взаимодействия фильтрующейся воды с поверхностью минерала. Во втором случае происходит диффузионное выщелачивание, вызванное диффузи-

онным перемещением солей в неподвижном поровом растворе при наличии разности концентраций. Этот процесс осложняется процессами перемешивания в результате действия каких-либо побочных факторов: температурных градиентов, осмотической фильтрации [139], естественной конвекции вследствие разности плотностей растворов и т. д.

Природа растворимости горных пород рассматривается в специальных работах [4, 132, 138 и др.]. Здесь отметим только некоторые самые общие понятия, связанные с этим процессом.

По интенсивности растворения горные породы можно разделить на легко-, средне- и труднорастворимые. Примером легкорастворимых пород может служить каменная соль, среднерастворимых — гипс и ангидрит и труднорастворимых — карбонатные породы (известняки, доломиты и др.). Развитие суффозии в природных условиях плохо поддается прогнозу, потому что заранее трудно учесть весь комплекс факторов, определяющих процесс растворения горных пород. Опыт показывает, что количественные зависимости, характеризующие эти процессы в натуре, отличаются от зависимостей, полученных в лабораторных условиях. Так, например, из учебной и справочной литературы известно, что предел растворимости гипса 2,65 *г/л*. Вместе с тем по данным опытов А. М. Кузнецова в лабораторных условиях на образцах пород соликамского комплекса при воздействии на них природной воды было установлено, что способность растворения гипса сохраняется до 10 *г/л*. Не получили еще практического применения ввиду их сложности и теоретические методы расчета, рекомендуемые разными авторами [31, 87, 138 и др.].

Процессы химической суффозии часто играют важную роль в жизни сооружений. Это объясняется прежде всего усилившейся за последние годы тенденцией строительства гидротехнических сооружений на суффозионно-неустойчивых грунтах. Большое значение процессы суффозии имеют также для решения задач, связанных с мелиорацией земель, с использованием засоленных грунтов для строительных целей и т. д. Беспрепятственное развитие процесса химической суффозии может привести, а иногда и приводит к резкому повышению водопроницаемости грунта, к образованию сосредоточенных путей фильтрации, карста, а также к потерям устойчивости грунта и осадкам.

Как уже отмечалось выше, контроль за развитием процессов химической суффозии ведется по данным чисто фильтрационных наблюдений и по результатам химического анализа проб воды, отобранных из изучаемого потока. Для этого пьезометрическая сеть должна контролировать все интересные с точки зрения процессов химической суффозии участки потока.

Методика отбора проб воды исследуемого потока по существу представляет собой самостоятельный вопрос, поэтому на изложении ее мы остановимся в следующем параграфе. Здесь же

рассмотрим только способы обработки данных натурных наблюдений за процессом суффозии.

По современным представлениям процесс химической суффозии в суффозионно-неустойчивых грунтах развивается постепенно. В грунт, содержащий растворимые включения, поступает вода, обладающая способностью растворения. По мере фильтрации в грунте происходит растворение и выщелачивание растворимых включений, причем вода в порах грунта насыщается понемногу, пока концентрация солей в ней достигнет условий динамического равновесия, при котором вода становится неагрессивной по отношению к растворяемому грунту. Таким образом, в грунте создается зона выщелачивания. В пределах этой зоны вода из ненасыщенной доходит до состояния полного насыщения. Размеры зоны выщелачивания для данных грунта и воды зависят от значений скорости фильтрации.

В настоящее время имеется ряд расчетных зависимостей, полученных для связных и и несвязных грунтов, определяющих интенсивность выщелачивания грунта как функцию проницаемости и скорости фильтрации [138]. К сожалению, эти зависимости плохо согласуются с натурными данными. Так, зона выщелачивания, оцениваемая по данным лабораторных проработок величиной в несколько десятков сантиметров в натуре, в действительности имеет значения, исчисляемые десятками и сотнями метров. Это несоответствие, вероятно, объясняется неоднородностью структуры грунта и условиями залегания растворимых пород (дисперсное, пластовое), в результате чего в натуре происходят различные химические процессы. Условия динамического равновесия меняются. Процесс насыщения сменяется процессом обеднения раствора за счет выпадения растворимых веществ в осадок или за счет развития обменных реакций.

Для контроля процесса суффозии по данным химического анализа проб воды, отобранных из пьезометров, следует прежде всего попытаться выяснить общие закономерности изменения химического состава потока [174]. При этом необходимо: 1) определить химический состав воды потока; 2) оценить степень агрессивности воды по отношению к фильтрующей среде и изменения химического состава вдоль потока; 3) выявить наличие каких-либо систематических изменений состава потока с течением времени; 4) оценить зависимость состава потока от расхода; 5) определить количественные соотношения, характеризующие этот процесс, и прежде всего скорость растворения пород.

Для решения таких вопросов следует изучать результаты анализа проб воды, отобранных с помощью пьезометров. Анализ проб проводится в соответствии со специальными рекомендациями [4]. При наличии значительного разброса показаний целесообразно определять осредненные характеристики. Для выявления общих закономерностей в изменении состава потока

необходимо строить графики изменения содержания солей и отдельных ионов в рассматриваемых точках потока с течением времени, а также строить карты изолиний минерализации или карты, характеризующие распределение каких-либо других показателей, особенно важных в данных условиях, например содержание иона кальция, распределение щелочных и кислых вод и т. д.

Общий принцип построения таких карт практически не отличается от принципов построения карт гидроизогипс и гидроизопьез (глава 3). При построении карт изолиний минерализации и других упомянутых выше карт используется линейная интерполяция, для чего все наблюдательные точки соединяются прямыми линиями и изменение минерализации в пределах данного отрезка прямой принимается линейным. Перед построением названных карт все данные натурных наблюдений должны быть подвергнуты детальному рассмотрению (глава 9) и сомнительные показания должны быть отброшены или особо выделены. В последнем случае построение искомых карт целесообразно проводить дважды, а именно: по всем данным и по данным только вполне достаточных наблюдений. Дальнейший анализ покажет, насколько такое выделение было целесообразным.

Пример карты изолиний минерализации приведен на рис. 8-17.

Для большей полноты анализа результатов натурных наблюдений планы изолиний минерализации и другие указанные выше карты следует совмещать с планами гидроизопьез и гидроизогипс. При этом в случае вод высокой природной минерализации следует учитывать изменение удельного веса. Основные принципы обработки результатов наблюдений в таких условиях можно найти в работе Н. Лущинского [34], который рассматривает различные способы определения градиента напора в зависимости от условий подготовки пьезометра к опыту. Так, если пьезометры заполнены пресной водой, то показания таких пьезометров могут быть использованы для определения градиентов напора в горизонтальной плоскости. Для определения градиента напора в вертикальной плоскости значение искомого градиента можно найти, если пьезометры заполнены водой, отвечающей тем изменениям минерализации по высоте пласта, которые имеют место в реальном потоке.

Для определения коэффициента диффузии непосредственно в натурных условиях используется методика, разработанная Дюкло [56, 77].

При свободном оттоке воды из выщелачиваемого грунта оснований развивается процесс механической суффозии, что увеличивает опасность потери устойчивости сооружений [164]. Этот факт свидетельствует о возможности одновременного существования нескольких видов фильтрационных деформаций в основаниях гидросооружений.

§ 7-8. Методика отбора проб воды на химический анализ из пьезометров

Отбор проб воды на химический анализ из пьезометров производится в фиксированных точках (в местах заложения водоприемников пьезометров) в некоторый заданный момент времени. Оценка любой существующей методики отбора проб на химический анализ дается в зависимости от того, насколько точно состав пробы соответствует составу воды потока в месте заложения пьезометра в момент отбора пробы.

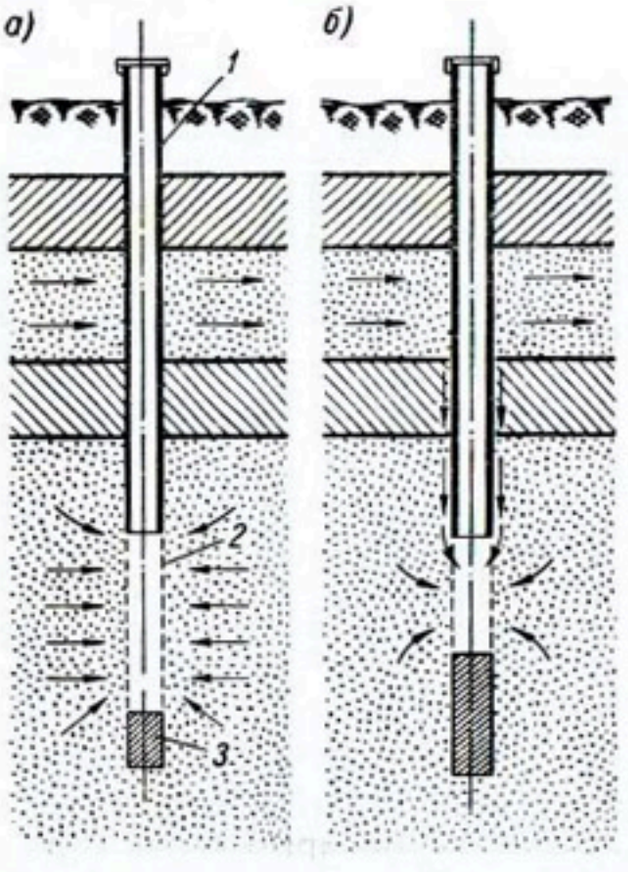


Рис. 7-8. Схема водозабора при отборе проб воды на химический анализ: *а* — исправный пьезометр; *б* — неисправный пьезометр.

1 — пьезометрическая труба; *2* — водоприемник; *3* — отстойник.

Важность получения надежных сведений о составе потока в каждой наблюдательной точке переоценить невозможно. Достаточно вспомнить, что представление о химическом составе потока и об изменениях этого состава со временем складывается на основании показаний одиночных пьезометров, редко расположенных на территории гидроузла. Относительно небольшие ошибки в определении состава потока по данным даже одного из пьезометров приводят к существенным искажениям всего плана изолиний минерализации и могут быть причиной ошибочных суждений о существе протекающих процессов.

В инструкциях по проведению отбора проб воды на химический анализ, используемых на гидротехнических сооружениях, отбор пробы из пьезометра обычно рекомендуется проводить после предварительной откачки воды в объеме, равном одному или двум объемам воды в пьезометре. Для выяснения существа соображений, положенных в основу этого требования, рассмотрим отбор пробы с помощью схемы некоторого типового пьезометра, представленной [1] на рис. 7-8.

Очевидно, что у исправного пьезометра, т. е. у пьезометра,

---

[1] Для простоты изображенный на рис. 7-8 пьезометр имеет прямолинейную ось. Нетрудно показать, что дальнейшие рассуждения не изменятся, если ось пьезометра будет представлена ломаной линией, как это обычно имеет место у закладных пьезометров.

стенки трубы которого непроницаемы, а водоприемная часть по всей высоте водоприемника проницаема, водообмен происходит только в водоприемнике. Вода в верхней части трубы, не участвующая непосредственно в этом водообмене, будет застойной.

Отбор пробы воды на химический анализ в случае напорного пьезометра осуществляется путем слива воды из крана, установленного в оголовке пьезометра, а в случае открытого или безнапорного пьезометра — с помощью специального пробоотборника, опускаемого в пьезометрическую трубу.

Отсюда следует, что состав воды пробы, отбираемой из напорного пьезометра, будет отвечать составу воды потока только в том случае, когда из пьезометра будет слита вся вода, заполняющая пьезометрическую трубу. Расчеты показывают, что это требование удовлетворяется при отборе из пьезометра воды в объеме, равном 1,5—2,0 объемам пьезометрической трубы.

Что касается отбора воды из безнапорного пьезометра, то после проведения предварительной откачки, вызывающей обновление воды в пьезометре, теоретически забор воды в пьезометре можно производить с любой отметки, поскольку предполагается, что весь пьезометр уже заполнен водой потока.

Однако изложенная методика отбора проб, на первый взгляд довольно обоснованная, является несовершенной. В самом деле, при значительной длине пьезометра требование откачки в объеме 1,5—2,0 объема пьезометра при малых значениях коэффициента фильтрации весьма затруднительно. Во-первых, процесс такой откачки должен занимать много времени, поскольку при этом следует стараться как можно меньше воздействовать на фильтрационный режим, и потому пьезометр должен сравнительно долго находиться в нерабочем состоянии. Во-вторых, пропуск больших объемов воды через водоприемник пьезометра может отрицательно сказаться на сохранности фильтра. В практике натурных исследований нередки случаи, когда использование пьезометров для целей отбора воды вызывало возражение специалистов (например, на Волжской ГЭС имени В. И. Ленина).

При проведении предварительной откачки воды из пьезометров требование об уменьшении до минимума влияния отбора воды на фильтрационный режим по техническим причинам не всегда удается выполнить. При отборе воды из глубинных пьезометров, пересекающих несколько более или менее самостоятельных водоносных горизонтов (рис. 7-8, *б*), при образовании течей в затрубном пространстве во время откачки в водоприемник может проникнуть вода из горизонтов, не контролируемых данным пьезометром.

К недостаткам откачки следует отнести также и возможность нарушения естественного расслоения потока за счет вовлечения в водоприемник вод из разных слоев, расположенных выше и ниже водоприемника. Такое вовлечение будет существенно зависеть от режима откачки, неизменность которого при

многолетних наблюдениях не всегда сохраняется. Таким образом, регистрируемые при анализах изменения химического состава могут быть результатом изменений условий отбора проб. Влияние природного расслоения потока на состав воды пробы может ощущаться еще сильнее в случае пьезометров с водоприемниками значительной длины (7—10 *м* и более). Такие водоприемники обычно устраивают при оборудовании пьезометров в скальных и полускальных трещиноватых породах. При подобных водоприемниках результаты анализа также будут зависимы от способа подготовки пьезометра, так как при пересечении водоприемником слоев с различной водопроницаемостью и при фильтрации в них вод с разной степенью минерализации состав воды в водоприемнике после откачки будет зависеть не только от объема откачанной воды, но и от интенсивности откачки.

Условия откачки, в свою очередь, определяются как внешними причинами, например мощностью насоса, так и состоянием водоприемника. Если с течением времени качества фильтра приемника или его длина существенно изменяются, то в условиях неоднородного по составу потока эти изменения могут сказываться на составе воды после подготовки пьезометра к отбору.

В качестве одного из существенных недостатков способа отбора проб с предварительной откачкой можно указать на чрезвычайную трудоемкость подготовки безнапорных пьезометров к отбору. В самом деле, объем воды в глубинных пьезометрах обычно составляет 100—200 *л*, а ввиду малости диаметра пьезометра (2—3 дюйма) откачка ведется вручную с помощью желонки.

Большие трудности представляет и отбор проб из пьезометров с капельным расходом при высокой степени минерализации грунтовых вод, что нередко встречается в практике. Сброс воды в соответствующем объеме из таких пьезометров иногда бывает практически невозможен. Не удивительно, что на практике в силу названных обстоятельств от проведения предварительных откачек отказываются даже в нарушение существующих инструкций.

С целью повышения надежности исследований химического состава фильтрационного потока и для облегчения условий отбора проб из безнапорных пьезометров во ВНИИГ была разработана методика отбора проб без предварительных откачек. Эта методика основана на совместном использовании данных электрометрии и фильтрационного каротажа. Под фильтрационным каротажем понимается определение эпюры горизонтальных скоростей фильтрации по высоте пласта. Для такого каротажа в качестве индикаторов удобно применять радиоактивные изотопы, причем ввиду возможности использования при указанном каротаже низких пусковых активностей (10—

20 *мккюри*) условия работы с радиоактивными веществами сильно упрощаются. Техника электрометрических измерений, основанных на изменениях электрического сопротивления природных растворов, подробно рассматривается в специальной литературе [49, 98]. Имеются также сведения о зависимости электропроводности от давления [214].

Для проведения опытов сконструированы и изготовлены специальные приспособления, описание которых приводится в [109, 173]. Проведение комплексного каротажа скважин, т. е. осуществление электрометрических измерений и фильтрационного каротажа, позволяет оценить распределение скоростей фильтрации по высоте водоприемника и соответствующие изменения минерализации. Типовой пример результатов такого каротажа приведен на рис. 7-9.

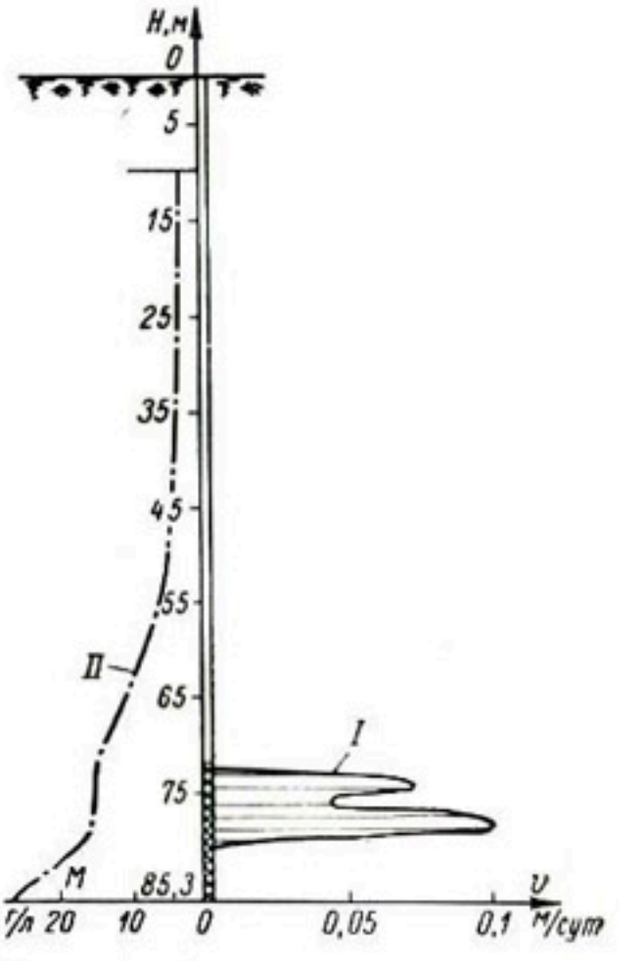


Рис. 7-9. Результаты фильтрационного каротажа пьезометра.

Заштрихованная часть — водоприемник пьезометра. *I* — эпюра скоростей фильтрации; *II* — график изменения минерализации вод по высоте пьезометра.

Сочетание двух разных методов опробования скважин дает возможность наметить местоположение наиболее интересных для анализа точек отбора. При этом фиксированная точка отбора должна располагаться в наиболее устойчивой части кривой распределения минерализации, с тем чтобы иметь уверенность, что небольшие смещения уровня отбора не влияют на результаты показаний. В дальнейшем в случае необходимости подобный каротаж можно возобновлять.

Все изложенное здесь в отношении комплексного каротажа относилось к случаю безнапорных пьезометров. В напорных пьезометрах непосредственное введение пробоотборника в фильтр пьезометра невозможно. Тем не менее некоторые изменения технологии отбора проб можно произвести и в этом случае. Так, на Камской ГЭС в настоящее время проводятся рекогносцировочные опыты по отбору проб с помощью трубок малого диаметра (0,5—1,0 *см*). Такие трубки устанавливаются в напорных пьезометрах так, чтобы нижний конец трубки располагался на отметке, с которой предполагается проводить отбор пробы. Верхний конец трубки пропускается через крышку пьезометра и снабжается зажимом. Во

время отбора пробы следует сбросить воду в объеме трубки, что значительно упрощает отбор и дает возможность провести точечные замеры на заданных отметках.

§ 7-9. Особенности исследований фильтрационного режима при фильтрационных деформациях грунта

Как уже указывалось, фильтрационные деформации горных пород возникают при определенных значениях скорости фильтрации и вызывают изменение водопроницаемости грунта, а следовательно, изменение фильтрационных расходов и пьезометрических напоров. Эти деформации обычно носят локальный характер и возникают на участках особенно неблагоприятного сочетания относительно неустойчивой структуры грунта и высоких градиентов напора.

В процессе исследования грунтов, подверженных фильтрационным деформациям, можно условно выделить две задачи. Первая задача заключается в предупреждении фильтрационных деформаций путем определения наиболее опасных мест и последующей разработки рекомендаций по принятию профилактических мер предосторожности. Вторая задача имеет целью своевременное выявление фильтрационных деформаций и их характеристик, достаточных для разработки мер по локализации и ликвидации этих деформаций.

Для проведения наблюдений с целью контроля фильтрационных деформаций грунта предусматривается должным образом развитая пьезометрическая сеть. Пьезометрические створы должны охватывать все участки подземного профиля или тела сооружений, где возможно предположить появление высоких градиентов напора и развитие фильтрационных деформаций. О рациональном размещении пьезометров уже говорилось в § 3-3. Подчеркнем, что при исследовании условий фильтрации в основании сооружений важно охватить пьезометрическими наблюдениями участки выхода потока на дневную поверхность. На таких участках имеется потенциальная опасность развития явлений суффозии. Наблюдаемые на указанных участках значения градиента напора должны быть сопоставлены с некоторыми расчетными значениями. Значения таких предельно допустимых расчетных значений градиентов напора $I_{доп}$ зависят от физико-механических характеристик и структуры грунта, от общих условий работы сооружения и т. д., а назначение $I_{доп}$ должно производиться дифференцированно. Ввиду большого практического значения правильного выбора искомых $I_{доп}$ определению этих параметров уделялось много внимания. Так, исследования в области определения предельно допустимых значений градиентов напора были проведены Р. Р. Чугаевым [184]. Им проанализировано большое количество известных из литературы

случаев разрушения напорных гидротехнических сооружений и определены средние значения градиента напора, имевшие при этом место. Следует заметить, что такие данные представляют несомненный практический интерес, однако обобщение существующих материалов затруднено несопоставимостью условий протекания наблюдаемых процессов (разные грунты, нагрузки, условия эксплуатации, температурные режимы и т. д.). В настоящее время для определения $I_{доп}$ пользуются рекомендациями, приводимыми в специальных указаниях, например [63, 68].

При исследованиях с целью выявления происшедших деформаций грунта основное внимание должно уделяться анализу изменений данных натурных наблюдений во времени. Особенно показательными для фильтрационных деформаций грунта являются сведения об осадках, фильтрационных расходах и пьезометрических напорах. Перед анализом материалов наблюдений с целью выявления фильтрационных деформаций следует по возможности оценить влияние сезонных и случайных факторов, например температуры воздуха и воды, уровней бьефов, работы дренажных устройств и т. д. с тем, чтобы выявить изменения показателей фильтрационного режима, которые определяются изменением фильтрационных характеристик грунта. Сопоставление данных об осадках и фильтрационных расходах не представляет каких-либо особых методических трудностей. При сопоставлении фильтрационных расходов следует обращать внимание на величину градиента напора, так как непосредственное сопоставление расходов возможно лишь в случае равенства градиентов напора.

Что касается анализа данных наблюдений за пьезометрическими напорами, то для облегчения этого анализа результаты наблюдений следует представлять не только в виде графиков колебания уровней воды в пьезометрах $h=f(t)$, но также в виде графиков приведенного пьезометрического напора $h_r=f(t)$.

На практике большое значение имеют сведения о фильтрационном давлении, оказываемом потоком на подошву сооружения, представляемые в виде эпюр фильтрационного давления. С помощью таких эпюр можно судить и об изменениях фильтрационных свойств грунтов. С этой целью желательно рассматривать отдельные части эпюр как можно более дифференцированно. Последнее требование объясняется тем, что поскольку в пределах изучаемого пласта одновременно могут происходить изменения фильтрационных свойств разной направленности, т. е. на одном участке пласта может иметь место суффозия, а на другом кольматация и т. д., то локальные изменения структуры грунта на одном участке могут также отражаться на распределении давления по длине всего пласта. В таких условиях, чтобы судить об изменениях плотности завесы, следует общую эпюру приведенных напоров заменить эпюрой приведенных напоров

на отдельном участке, прилегающем к завесе. При этом приведенный напор определяется по отношению (рис. 7-10):

$$h'_r = \frac{h - h_3}{h_1 - h_3},$$

где h_1, h_2, h_3 — напоры в точках контура с соответствующими индексами. Как видно на рис. 7-10, в данном случае изменение перепада напора на завесе было кажущимся и объяснялось только влиянием подпора низовой части потока.

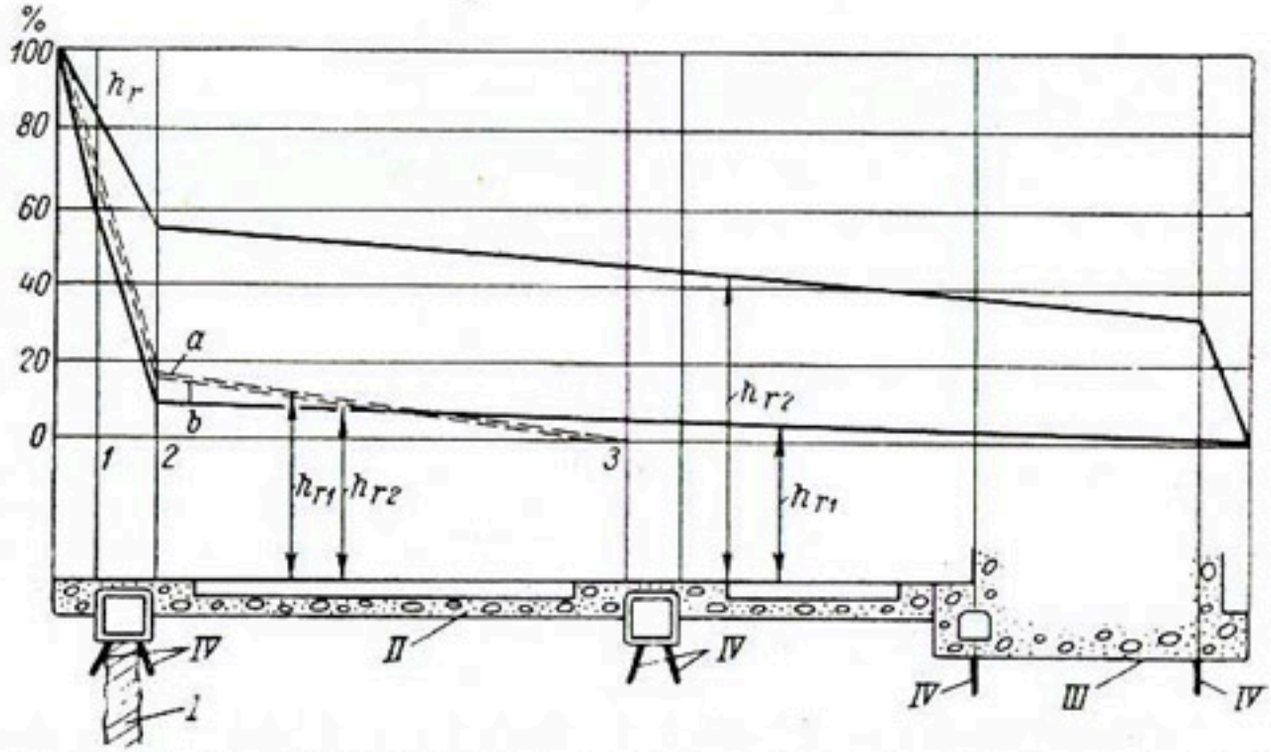


Рис. 7-10. Эпюры приведенных напоров при кольматации низовой части основания.

I — цементационная завеса; *II* — понур; *III* — фундаментная плита; *IV* — пьезометры; h_{r1} и h_{r2} определяют фильтрационное давление в моменты t_1 и t_2, причем $t_2 > t_1$. Кривые *a* и *b* являются эпюрами приведенных напоров h'_{r_1} и h'_{r_2} на участке 0—3 для моментов времени t_1 и t_2.

В заключение несколько слов скажем в отношении методики наблюдений некоторых процессов, связанных с взаимодействием фильтрационного потока и пористой среды и часто сопутствующих явлениям химической суффозии. К таким процессам можно отнести выщелачивание бетона сооружений под действием агрессивных вод и газообразование.

Наблюдения за коррозией бетона проводятся по данным о фильтрации через бетон и путем отбора кернов. Наблюдения за фильтрацией через бетон, в частности, могут осуществляться на отдельных трещинах, а вообще такое определение представляет известные трудности, так как при анализе фильтрационных расходов через сооружение надо в этом случае выделить часть расхода, обусловленную фильтрацией через бетон. Обычно указателем наличия такой составляющей (вызванной трещинами

в бетоне) является зависимость фильтрационного расхода от температуры бетона. Для этого необходимо систематически замерять температуру бетона, а затем сопоставлять график изменения расхода с графиком изменения температуры [59, 74]. Методика таких наблюдений подробно излагается в специальных работах [74].

Изучение газовыделения на гидротехнических сооружениях до сих пор поставлено еще очень плохо. Вместе с тем этот вопрос, несомненно, чрезвычайно важен для оценки условий работы сооружения. Исследования последних лет [84] показали, что газопроявление имеет место на многих гидроузлах на р. Каме и Волге. С течением времени газопроявление растет. Это дает основание предполагать, что, может быть, газопроявление можно рассматривать в качестве одного из важных интегральных показателей условий работы сооружений. Разработку методики наблюдений за газопроявлением на гидротехнических сооружениях следует считать одним из наиболее актуальных вопросов.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

§ 8-1. Общие замечания о методике натурных исследований фильтрации на гидротехнических сооружениях

При составлении программы натурных исследований фильтрации выбирают рациональный способ и намечают последовательность операций по изучению фильтрационных характеристик водоносного пласта и грунтового потока.

При этом можно различать исследования, основанные на наблюдениях за естественным состоянием потока (режимные наблюдения) и на наблюдениях за искусственно возмущенным потоком. Известные методические особенности имеют также исследования по данным наблюдений, осуществляемых систематически (регулярные наблюдения фильтрации), и по результатам наблюдений, проводимых эпизодически по специально разработанной программе (например, наблюдения при разовых опытно-фильтрационных работах).

О видах наблюдений при натурных исследованиях фильтрации говорилось ранее. Из них в качестве важнейших можно, не останавливаясь на деталях, назвать наблюдения за пьезометрическими напорами, фильтрационными расходами и скоростями, за химическим составом и температурой грунтовой воды. Что же касается методов воздействия на фильтрационный поток при натурных исследованиях фильтрации, то здесь имеется весьма большое разнообразие. Можно отметить гидравлические методы опробования пластов (откачки, нагнетания и т. д.), геофизические методы исследования (электрические, ультразвук и т. п.), индикаторные и др.

Натурные исследования фильтрации должны проводиться в периоды проектирования, строительства и эксплуатации сооружений. Задачи таких исследований перечислены в главе 1. Для каждого из названных периодов имеется своя специфика в методике натурных исследований, определяемая как кругом задач исследований, так и условиями их проведения.

В период проектирования гидросооружений основной задачей фильтрационных исследований является определение гидрогеологических параметров, фигурирующих в расчетах, а также уточнение строения водоносного пласта с целью правильного выбора расчетной схемы. При этом используются главным образом данные опытно-фильтрационных работ [165], т. е. специальных водопонижений и нагнетаний, опытов с индикаторами, отборы кернов и т. д.

В период строительства к названным задачам добавляется контроль и анализ результатов воздействия строительных работ на фильтрационный режим на строительной площадке и прилегающей к ней территории. Наблюдения в период производства работ позволяют своевременно выявить места, неблагополучные в фильтрационном отношении, оценить эффективность отдельных мероприятий по защите основания, а также проверить качество проводимых работ. В этот период основным источником информации являются режимные наблюдения. Специальные исследования пласта: откачки, опыты с индикаторами — проводятся только в случае необходимости.

Исследования фильтрации в период эксплуатации сооружений, в дополнение к сказанному, преследуют еще цели выявления эффективности различных конструктивных элементов сооружения и оценку фильтрационного режима с точки зрения проверки проектных предположений. Так же, как и в период строительства сооружений, основным источником информации являются режимные наблюдения, которые по мере необходимости пополняются результатами отдельных опытно-фильтрационных работ.

Влияние физико-механических характеристик пластов сказывается главным образом на объеме натурных исследований фильтрации. Так, при исследованиях в суффозионно-устойчивых грунтах иногда можно ограничиваться наблюдениями пьезометрических напоров и фильтрационных расходов. В случае грунтов, подверженных действию химической суффозии, обязательны наблюдения и за химическим составом потока. На объем натурных исследований фильтрации влияют также тип и класс сооружения.

Методика натурных исследований фильтрации за последние годы получила значительное развитие. Так, например, опытным путем было показано, что для успешного решения поставленных задач необходимо, как правило, основываться на результатах комплексных исследований фильтрационных потоков, когда одновременно применяются принципиально различные способы определения фильтрационных характеристик пластов, а натурные методы исследования сочетаются с теоретическими и лабораторными.

Для определения фильтрационных характеристик пластов хорошо зарекомендовали себя и такие новейшие методы

исследований, как нейтронный и гамма-каротаж, радиоактивные индикаторы и другие. Большое распространение получает методика определения фильтрационных характеристик пласта в условиях неустановившейся фильтрации. Таким образом, в настоящее время в области методики проведения натурных исследований фильтрации имеются известные сдвиги. В связи с этим следует напомнить, что успешность проведения натурных исследований фильтрации зависит не только от методики наблюдений, но и в большой степени от методики обработки результатов этих наблюдений. Общие рекомендации по методике обработки данных натурных наблюдений приводятся в работе О. Н. Носовой [114].

Гидротехнические сооружения очень разнообразны. Насчитывается более 100 видов гидросооружений [195]. По целевому назначению они подразделяются на 6 типов: водоподпорные, водопроводящие, регуляционные, водозаборные, водосбросные и специальные. Все названные категории гидросооружений в большей или меньшей степени подвержены влиянию фильтрации, которая иногда имеет решающее значение при выборе типа сооружения и его конструкции.

Однако натурные фильтрационные исследования различных типов гидросооружений имеют ряд общих черт и применяемые при таких исследованиях методы одинаковы для разных типов сооружений.

В данной главе остановимся на характерных исследованиях фильтрации, проводимых на многих типах гидросооружений и главным образом на типах сооружений, входящих в состав гидроузлов.

§ 8-2. Натурные исследования фильтрации при проектировании сооружений

При проектировании гидротехнических сооружений (гидроузлов, оросительных и осушительных систем) необходимо иметь описание физико-географических условий: климата, рельефа местности, водоемов и водотоков и данные о геологическом строении и о гидрогеологических условиях района строительства. Данные по геологии района состоят в описании стратиграфии, литологии и геоморфологии пород. По разделу гидрогеологии необходимо располагать данными о режиме подземных вод, имея в виду форму и кинематику подземных потоков в водоносных горизонтах, гидравлическую взаимосвязь этих горизонтов и связь их с источниками питания в пределах района, фильтрационные характеристики пород и гидрохимические характеристики водоносных горизонтов. Гидрогеологические материалы получаются в результате соответствующих натурных и лабораторных исследований.

Состав и объем исследований зависит от характера и класса сооружений, от геологической и гидрогеологической обстановки данного района. Состав и объем исследований, необходимых для проектирования, определяются гидрогеологами совместно с проектировщиками, которые должны учитывать все необходимые для проектирования данные о фильтрации в районе постройки и на территории подпора грунтовых вод. Эти данные должны быть достаточными для составления расчетных схем, обеспечивающих возможность применения имеющихся методов фильтрационного расчета — теоретических и экспериментальных [29]. Некоторые принципиальные указания по поводу схематизации природных условий при фильтрационных расчетах имеются в литературе [12, 25].

При проектировании гидротехнических сооружений любого назначения необходимо располагать сведениями о форме подземного потока в имеющихся водоносных горизонтах. В этом отношении существенную роль играют стационарные наблюдения, проводимые гидрогеологическими станциями. При отсутствии данных о режиме грунтовых вод в районе проектируемых сооружений эти данные необходимо получить посредством наблюдений за уровенным режимом грунтовых вод на специально устроенной сети наблюдательных скважин (глава 3). Сведения об уровенном режиме подземных вод в водоносных горизонтах, залегающих под основаниями сооружений, должны охватить характерные периоды максимальных и минимальных напоров. Особенно, конечно, это относится к верхнему водоносному горизонту. Сведения об уровенном режиме грунтовых вод заключаются в графиках изменения во времени уровней воды в пьезометрах. На основании этих графиков строятся карты гидроизогипс и гидроизопьез естественных грунтовых потоков в различных горизонтах для характерных моментов времени (§ 3-4).

После возведения сооружений и наполнения верхнего бьефа указанные карты гидроизогипс и гидроизопьез обычно радикально изменяются. Но при проектировании производства работ по возведению сооружений в строительных котлованах важно иметь сведения о естественном режиме грунтовых вод. Соответствующими расчетами водопонижения, в основу которых кладется, в частности, режим грунтовых вод, обеспечивается устойчивость откосов и дна котлована, а также надлежащее состояние грунта оснований сооружений.

Исследования фильтрации перед проектированием обычно заключаются в кустовых откачках с целью определения общей и частной водопроницаемости пород. В случае скальных оснований водоподпорных гидросооружений при отсутствии грунтовых вод проводятся с той же целью опытные нагнетания. В бортах долины для определения коэффициента фильтрации верхнего пласта употребляются способы инфильтрации. Все эти способы описаны в главе 5.

В районе расположения плотин и гидроэлектростанций важно иметь данные о гидравлической связи между водоносными горизонтами. Для установления такой связи можно, например, произвести откачку грунтовой воды из вышележащего горизонта и наблюдать за уровнем воды в наблюдательной скважине, пробуренной до нижележащего горизонта. При наличии гидравлической связи откачка из верхнего горизонта вызовет изменение напора в указанной наблюдательной скважине.

При проектировании плотины в берегах реки по оси проектируемого сооружения закладываются кусты буровых скважин по схеме, изображенной на рис. 8-1, рекомендуемой А. И. Силиным-Бекчуриным [156]. Куст наблюдательных скважин имеет четыре луча, из которых два расположены по направлению водного потока, а другие два — по оси сооружения. Подобная схема является вполне обоснованной с гидрогеологической стороны. Наблюдательные скважины правого луча, расположенного поперек оси водотока, находятся в зоне выветрелых пород, что особенно важно для исследования фильтрации под сооружениями. Нижний луч, параллельный оси водотока, расположен в зоне выхода грунтовых вод, фильтрующихся в обход берегового примыкания в нижний бьеф. Расстояния между скважинами, исходя из соображений о форме потока, притекающего к центральной скважине, рекомендуется брать различными для различных грунтов. Именно, расстояние между центральной скважиной *1* и скважинами *2* берется в пределах 2—10 *м*, между скважинами *2* и *3* — от 3 до 20 *м*, между скважинами *3* и *4* — от 5 до 30 *м*. Нижние пределы относятся к песчано-глинистым, верхние — к гравелистым и трещиноватым породам.

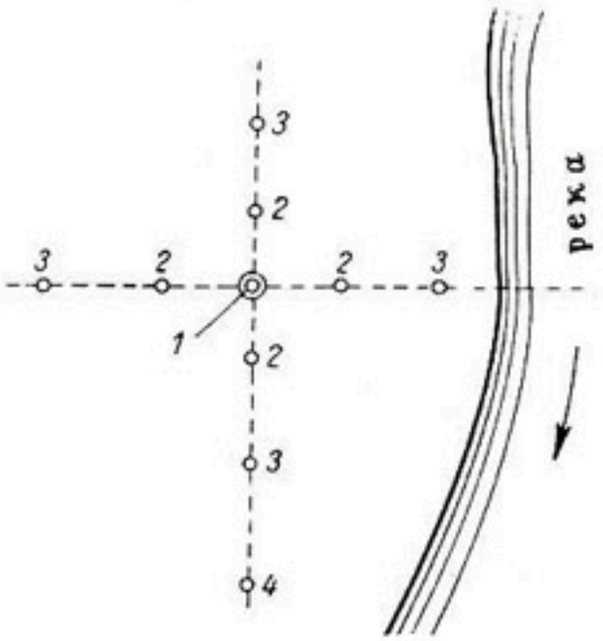


Рис. 8-1. Схема расположения скважин в створе проектируемой плотины
1 — центральная скважина; *2, 3, 4* — наблюдательные скважины.

В практике гидрогеологических исследований имеются обоснованные методические указания по поводу состава и объема работ по гидрогеологическим изысканиям для гидростроительства [151]. Методика гидрогеологических исследований в значительной степени зависит от геологического строения долины, типа и класса сооружения.

Необходимо иметь сведения о химическом составе воды. Грунтовая вода может оказаться агрессивной по отношению

к железу и бетону, что оказывает влияние на конструкцию подземной части сооружений.

Кроме того, возможно наличие в грунте оснований гидросооружений растворимых веществ. При больших скоростях фильтрации после наполнения верхнего бьефа процесс химической суффозии становится более интенсивным. В связи с проектированием плотин необходимо, помимо района самого гидроузла, исследовать район будущего водохранилища и территорию, на которой после наполнения водохранилища будет иметь место подпор грунтовых вод. В районе водохранилища важное значение имеют исследования водопроницаемости пород, слагающих его дно и борта. Здесь, в зависимости от характера пород, применяются откачки, нагнетания и инфильтрационные способы. В местах, где по предварительным данным предполагаются большие фильтрационные расходы, закладываются скважины и шурфы для проведения уточняющих исследований водопроницаемости. При наличии трещиноватых скальных пород необходимо изучить характер трещиноватости и коэффициент фильтрации в направлениях трещин (глава 5).

В районе подпора грунтовых вод закладываются буровые скважины по поперечникам, разбитым, как указывалось в § 3-2. Следует иметь в виду, что при проектировании гидроузла производятся расчеты подпора грунтовых вод частично на основании данных о положении их естественных уровней. Таким образом, для прогноза подпора грунтовых вод необходимо иметь карты гидроизогипс естественного грунтового потока. Подпор грунтовых вод достигает приблизительно той гидроизогипсы, отметка которой равна отметке нормального подпертого горизонта.

Для прогноза подпора грунтовых вод, вообще говоря, не требуется знаний коэффициентов фильтрации отдельных пластов на обширной территории подпора, а достаточно иметь численные значения водопроводимости пласта в различных точках и глубины залегания водоупора [9].

При проектировании систем орошения фильтрационные исследования преследуют различные цели. При использовании грунтовых вод для орошения необходимо установить их возможный дебит и химический состав. Для этого исследуют имеющиеся водоносные горизонты, т. е. их мощность, напор, коэффициенты фильтрации и их плановые размеры. Для определения производительности и коэффициентов фильтрации закладываются кусты буровых скважин, состоящие из одной центральной и наблюдательных, и производятся откачки. По данным откачек определяется коэффициент фильтрации (глава 5) и дебит при различных величинах понижения напора S. Далее определяется необходимое количество скважин для получения соответствующего расхода на орошение. Конечно, при этом необходимо иметь в виду интерференцию скважин.

На площади орошения производятся исследования водоносности пород, их водопроницаемости и химического состава. По данным наблюдений строятся карты гидроизогипс, на основании которых составляются прогнозы фильтрационного режима при работе оросительной системы [82].

Химический состав грунтовой воды имеет первостепенное значение при проектировании оросительных систем ввиду возможного засоления почв.

В районах подпора грунтовых вод вследствие наличия водохранилищ или оросительных каналов проектирование дренажных систем основывается на расчетах по определению формы грунтового потока в условиях регулирования уровней воды в водохранилище, и искусственные факторы здесь имеют превалирующее значение. То же можно сказать и о проектировании дренажа в районах орошения. Однако при проектировании осушения заболоченных территорий естественные режимообразующие факторы являются обычно определяющими параметрами осушительных систем. Для проектирования осушительных систем в заболоченных районах посредством гидрогеологической съемки изучаются геологическое строение района осушения, залегание водоносных горизонтов и химический состав грунтовых вод, взаимосвязь грунтовых вод и водотоков. На основании этих данных строятся карты гидроизогипс и гидроизопьез для характерных моментов времени.

Производится определение коэффициента фильтрации путем опытных откачек. В торфяных болотах ввиду слабой проницаемости торфа определение его коэффициента фильтрации затруднительно, и для этой цели используются данные лабораторных исследований на монолитах торфа.

Натурные исследования фильтрации в болотистых районах имеют некоторые особенности в связи с различными типами болот, характеризующимися различными условиями водного питания их [101].

Если режим грунтовых вод в заболоченной местности подвергается влиянию напорных вод нижележащих горизонтов, то фильтрационные исследования этих горизонтов имеют весьма большое значение. Необходимо выяснить характер гидравлической связи верхнего и напорного горизонтов, что позволит запроектировать рациональную конструкцию дренажной сети.

Изучение динамики химизма грунтовых вод при проектировании дренажных сетей, а также определение коэффициентов водоотдачи существенно важны.

В районах проектируемых водозаборов для водоснабжения населенных мест, помимо гидрогеологической съемки, производят исследования режима грунтовых вод, используя специальные створы, проходящие в месте проектируемого водозабора. Один из створов располагают по направлению течения грунтовых вод, а другой — перпендикулярно направлению течения.

Конечные наблюдательные точки на створах закладывают за пределами поверхности депрессии при отборе грунтовых вод. Производят опытные откачки для определения производительности грунтового потока и определяют коэффициент фильтрации пласта [131].

Естественные ресурсы подземных вод (по терминологии Ф. П. Саваренского) в общем балансе данного бассейна определяются расходом, поступающим на питание подземных вод. Эксплуатационные ресурсы, по терминологии Б. И. Куделина, т. е. расход подземных вод, извлекаемых для целей водоснабжения, составляют часть естественных ресурсов. Поэтому при проектировании мощных водозаборов необходимо определить размер естественных ресурсов подземных вод. Такое определение производится различными способами [25]. Некоторые из них расчетные, основанные на связи естественных ресурсов с интенсивностью атмосферных осадков, с гидрографами рек и т. д. Имеются способы, основанные на наблюдениях за понижением уровней грунтовых вод.

Гидрогеологический способ требует постановки фильтрационных исследований, в результате которых естественные ресурсы (фильтрационный расход) вычисляются по формуле:

$$Q_e = \frac{k_1\omega_1 + k_2\omega_2}{2} I, \qquad (8\text{-}1)$$

где ω_1 и ω_2 — живые сечения потока; k_1 и k_2 — соответствующие этим сечениям средние коэффициенты фильтрации; I — средний градиент напора между данными сечениями.

Из формулы (8-1) видно, что данный способ требует проведения значительного количества натурных исследований. Помимо карт гидроизогипс и гидроизопьез, требуется определить коэффициенты фильтрации в различных сечениях потока. В настоящее время имеется подробная таблица классификации ресурсов подземных вод для целей водоснабжения [128].

При наличии нескольких водоносных горизонтов опытные откачки производятся в каждом из них, а затем сравниваются их водоносность, качество воды и т. д. Опытные работы, в зависимости от геологического строения грунтов (ледниковые, аллювиальные и т. д.) и их водоносности, могут иметь некоторые особенности [156].

Следует отметить важное обстоятельство, выявляемое путем исследований фильтрации, а именно: при откачке из одного горизонта подсос подземной воды из соседнего горизонта. Это возможно при наличии гидравлической связи между соседними горизонтами. Иногда такой подсос значительно ухудшает качество забираемой воды. В связи с этим при наличии воды разного качества в соседних горизонтах следует выяснить путем пробных откачек с соответствующими наблюдениями за

пьезометрическими уровнями наличие гидравлической связи между горизонтами.

Остановимся на натурных исследованиях фильтрации при проектировании горных выработок. Как известно, откачка шахтных вод имеет большое значение при добыче полезных ископаемых. Для характеристики притока воды к горным выработкам введено понятие коэффициента водообильности, который определяется формулой:

$$K = \frac{Q}{P}, \tag{8-2}$$

где Q — водоприток, $м^3/сут$; P — вес добытого за сутки полезного ископаемого, $т$. Обычно $K = 2{,}5 \div 3$, а иногда он достигает 15—30.

В зависимости от категории запасов полезных ископаемых [156] исследования фильтрации имеют различные масштабы. Вообще исследования фильтрации сводятся к определению коэффициентов фильтрации отдельных горизонтов, напоров в этих горизонтах и гидравлической связи между ними. Детальные исследования проводятся при помощи сети буровых скважин, причем производится откачка на кустах скважин, измеряется температура подземных вод и изучается их химический состав. Фильтрационные исследования должны установить статические запасы подземных вод, так как эти запасы при вскрытии и первоначальной эксплуатации срабатываются путем откачки и дают максимальный расход. При дальнейшей разработке месторождений, если только не встречаются новые мощные водоносные горизонты, приток подземной воды в шахты уменьшается, и воронка депрессии, образующаяся вокруг района горных разработок, увеличивается. Заметим, что изменение режима подземных вод в районах горных разработок не имеет периодического характера в связи с непрерывным расширением фронта работ. Поэтому и исследования фильтрации в период эксплуатации горных выработок непрерывно развиваются, дополняясь сведениями, полученными непосредственно из наблюдений в горных выработках [101, 136, 156, 166].

§ 8-3. Натурные исследования фильтрации в период производства работ

В § 1-2 было указано на развитие за последние годы фильтрационных исследований в процессе строительства сооружений. Роль производства работ по возведению гидросооружений велика. Недоброкачественное производство работ может привести к авариям даже при хорошо выполненном проекте, что подтверждается при изучении аварий и разрушении сооружений. Поэтому натурные исследования фильтрации в процессе строительства приобретают ответственное значение, особенно если

принять во внимание, что в условиях проектирования невозможно предусмотреть все обстоятельства производства работ, связанные со многими природными факторами: геологическими, метеорологическими и пр. Кроме того, некоторые фильтрационные процессы, происходящие, например, при намыве плотин и дамб, требуют постоянного наблюдения за фильтрацией.

При осушении строительных котлованов гидросооружений, осуществляемом обычно при помощи систем скважин и иглофильтров, основные наблюдения за фильтрацией относятся к определению фильтрационного расхода и поверхности депрессии внутри котлована и на некотором расстоянии вне него. В случае водопонижения в напорных горизонтах производятся наблюдения за напорами. Схемы строительных котлованов и формы грунтовых потоков довольно разнообразны [102]. На рис. 8-2 приведена схема фрагмента строительного котлована, осушаемого с помощью скважин и иглофильтров в соответствии с наличием двух водоносных горизонтов, разделяемых слабоводопроницаемым слоем. Для наблюдения за поверхностью депрессии верхнего водоносного горизонта и напорной поверхностью нижнего горизонта необходимо иметь две системы наблюдательных скважин. Особый интерес представляет поверхность депрессии внутри котлована, которая определяется посредством замера уровней воды в наблюдательных скважинах или шурфах.

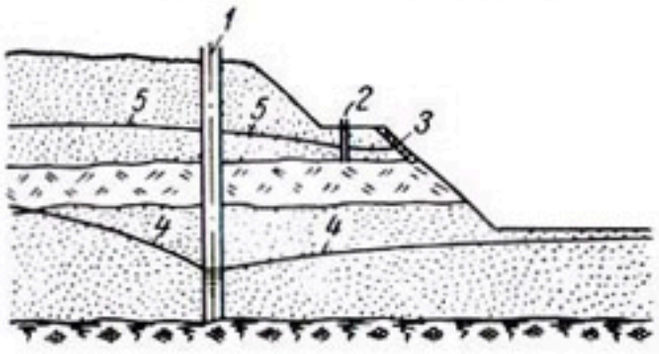


Рис. 8-2. Фрагмент строительного котлована.

1 — скважина; *2* — иглофильтры; *3* — пригрузка откоса; *4* — кривая депрессии нижнего горизонта; *5* — кривая депрессии верхнего горизонта.

Сведения о расходе водопонизительной установки следует иметь по группам скважин ввиду неравномерности притока к ним грунтовых вод. Максимальные расходы притекают, разумеется, со стороны реки. Весьма наглядное представление о работе водопонизительной установки дает график удельного расхода, т. е. расхода, приходящегося на погонный метр линии водопонизительных скважин.

Определение расходов и форм поверхности депрессии производится в течение всего времени строительства, но в этом промежутке времени следует выделить три характерных и неравноценных по продолжительности периода: период нормальной работы водопонизительных установок в межень, период форсированной работы в паводок, характеризующийся неустановившимся режимом фильтрации, и период первоначальной откачки из котлована. Особо характерным в отношении фильтрации является период первоначальной откачки, когда водопонизительная

установка работает с целью понижения естественного уровня грунтовых вод до проектных отметок. Если строительный котлован наполнен водой, то для его осушения используется открытый водоотлив. Интенсивность водоотлива определяется из условия устойчивости откосов котлована, которые при быстром понижении уровня воды в котловане могут оплывать. В некоторых случаях наблюдалось возникновение ключей и разрыхление дна котлованов. Так, из-за неудовлетворительной работы установки глубинного водопонижения в котловане бетонной плотины Волгоградской ГЭС при осушении котлована без глубинного водопонижения возникло большое количество источников, и грунт основания плотины был разрыхлен [96]. Если под дном котлована имеется напорный горизонт, то во избежание избыточного напора, взвешивающего дно котлована, определяется время разгрузки напорного горизонта, исходя из уравнений упругого режима пласта [102].

Таким образом, в период первоначальной откачки важно вести наблюдения за поверхностью депрессии у дна и откосов котлована, а также за давлением в напорном пласте, расположенном под дном котлована.

Поверхности высачивания воды на откосы обычно пригружаются фильтрующим материалом, и за ними ведутся систематические наблюдения.

В процессе работы в котловане зачастую меняется режим водопонизительных установок, ставятся дополнительные скважины или иглофильтры, укрепляются откосы котлована и т. д. Наблюдения за фильтрацией здесь тесно связаны с повседневными мероприятиями, они должны быть по возможности многосторонними, так как фильтрация при эксплуатации котлованов с водопонизительными установками играет решающую роль. Большое значение имеет фильтрация в перемычках, ограждающих котлованы. Перемычки по конструкции представляют собой низконапорные плотины, выполненные чаще всего из местных материалов. Перемычки сооружаются из песчаных и глинистых грунтов, из каменной наброски с экраном, они бывают ряжевые, шпунтовые и т. д. Если перемычка не является элементом гидросооружения, например, земляной плотины, то ее существование будет кратковременным и главная цель перемычки заключается в ограждении от воды строительного котлована, расположенного в русле реки. Отсюда следует, что перемычка должна быть по возможности слабопроницаемой. С этой целью перемычки с напорной стороны покрываются экранами или имеют шпунтовые стенки, иногда производятся цементация основания, искусственная кольматация и т. д. У подошвы низового откоса земляной перемычки обычно сооружается дренажная призма, снабженная обратным фильтром.

Наблюдения за фильтрацией в строительных перемычках заключаются в основном в замерах фильтрационного расхода

воды, поступающей в котлован. Определяется форма кривой депрессии в различных створах перемычки.

На основании наблюдений строится график фильтрационного расхода $Q=f(t)$. Этот график в особенности важен при проходке паводков. Совместно с ним строится график отметки уровня воды в реке. График расходов — основной показатель работы перемычки. По мере роста паводка фильтрационный расход увеличивается, причем это увеличение ориентировочно следует зависимости $Q=AH^n$, где H — напор над плоскостью дна котлована; A — постоянная; n — показатель, изменяющийся в пределах от 1 до 2.

Однако при возникновении механической суффозии зависимость между фильтрационным расходом Q и напором H нарушается. Расход резко увеличивается, и тогда требуется принимать меры к уплотнению перемычки.

Механическая суффозия обнаруживается при помощи визуальных наблюдений за откосами перемычки, фильтрами и дном котлована, в котором при наличии суффозии грунта основания появляются сосредоточенные выходы грунтовых вод в виде ключей.

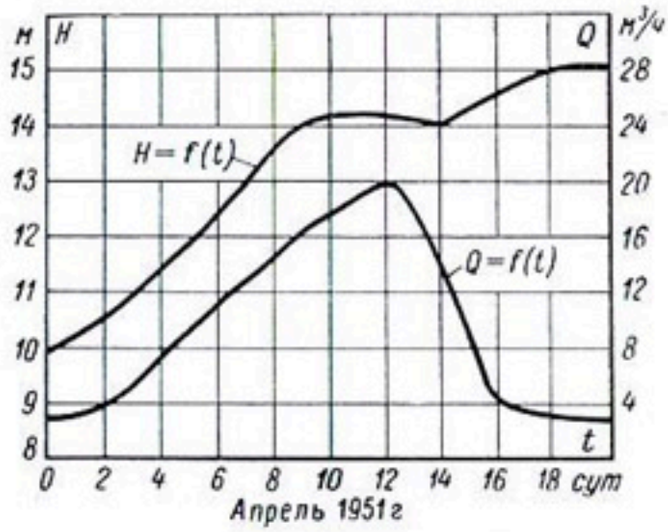


Рис. 8-3. Графики расхода Q и напора H перемычки.

График $Q=f(H)$ наглядно свидетельствует о наличии кольматации верхового откоса перемычки и ее понурной части. Влияние кольматации иллюстрируется графиком фильтрационного расхода перемычки при строительстве Камской ГЭС (рис. 8-3), на котором видно, что при почти постоянном напоре фильтрационный расход вследствие кольматации в течение четырех суток уменьшился в 5 раз [28].

При вскрытии котлованов нередко обнаруживаются существенные пробелы в гидрогеологической характеристике оснований будущих гидросооружений. В толще основания могут залегать слабоводопроницаемые или же, наоборот, сильнопроницаемые прослои и линзы, которые, несмотря на ограниченные размеры, могут оказать значительное влияние на фильтрацию в основании, перераспределяя давления на флютбет, выходные скорости фильтрации и т. д. Необходимо, помимо определения формы таких образований, характеризовать их водопроницаемость одним из известных способов, в зависимости от условий. При вскрытии котлована вообще можно получить дополнительные сведения о фильтрационных свойствах пород основания.

Образцы пород в случае надобности подвергаются исследованиям на химическую и механическую суффозию. Одним из известных полевых способов (глава 5) определяются коэффициенты фильтрации пород основания.

Если часть сооружений гидроузла уже возведена, то имеющаяся в них пьезометрическая сеть используется для наблюдений в период производства работ. До конца строительного периода показательными являются пьезометрические наблюдения во время паводков, которые уже могут характеризовать режим фильтрации под возведенными сооружениями. В случаях каких-либо нежелательных отклонений существующего режима от проектных предположений эти наблюдения помогают наметить дополнительные мероприятия по борьбе с фильтрацией при относительно низком напоре.

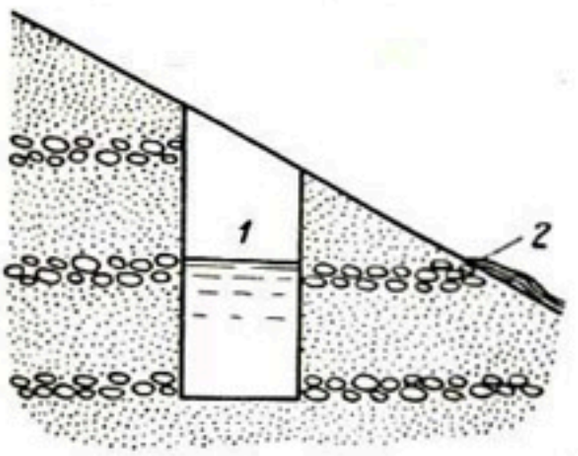


Рис. 8-4. Исследование фильтрационных ходов в теле сооружаемой земляной плотины.
1 — шурф; *2* — ключ.

В тех же условиях строительства на уже возведенных сооружениях проводятся наблюдения за фильтрацией в осадочных швах.

При возведении земляных плотин в результате расслоения при отсыпке могут образовываться горизонтальные фильтрационные ходы, которые можно обнаружить посредством несложных исследований. Для конкретности приведем пример постройки Ортотокойской плотины на р. Чу [51]. При отсыпке плотины из крупнообломочного материала вследствие расслоения в зонах средоточия крупных частиц образовались фильтрационные ходы. При напоре 32 *м* на низовом откосе на 6—7 *м* ниже подпертого уровня образовались ключи с дебитом $Q=17$ *л/сек*, причем вода содержала мелкие частицы. Опытный шурф (рис. 8-4) подтвердил существование расслоений грунта. Ключ образовывался на уровне воды, налитой в шурф.

При намыве плотин с ядром из тонкозернистого материала процесс консолидации протекает иногда довольно медленно. Под действием нагрузки в грунте возникает поровое давление, значительно превосходящее гидростатическое. Избыточное (над гидростатическим) поровое давление измеряется при помощи заложенных в грунт пьезометров специального типа или пьезодинамометров [43]. С течением времени избыточная вода отжимается из пор грунта, грунт постепенно уплотняется и прочность его увеличивается. Если избыточное поровое давление составляет свыше 25% от гидростатического, то задача о допустимой интенсивности намыва относится к области механики грунтов.

При намыве безъядерных плотин из крупнозернистых песчаных и супесчаных грунтов консолидация происходит довольно быстро. Но при большой интенсивности намыва кривая депрессии в теле плотины повышается, и устойчивость плотины может значительно понизиться. Таким образом, интенсивность намыва ограничивается устойчивостью откоса плотины на обрушение. Заметим, что в практике гидротехнического строительства значительная часть аварий гидросооружений приходится на долю намывных плотин.

Имеются работы, в которых устанавливается зависимость между интенсивностью намыва и водоотдачей намытого грунта [38].

С. И. Горюнов предложил следующий критерий максимальной допустимой интенсивности намыва безъядерных плотин [47]. Интенсивность беспрудкового намыва, выражаемая в высоте намытого слоя в сутки, равна

$$\Delta H = \frac{q_и - k\tau}{m'}, \qquad (8\text{-}3)$$

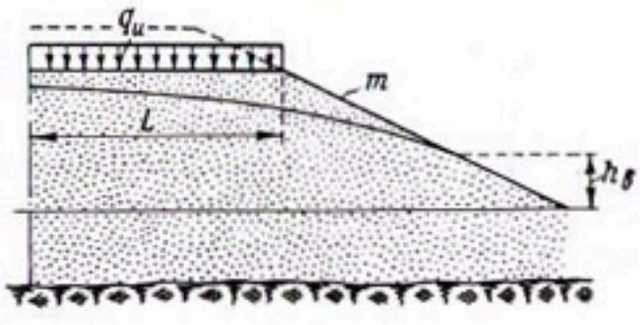


Рис. 8-5. Схема беспрудкового намыва плотины.

где $q_и$ — расход инфильтрации с поверхности намыва (рис. 8-5), k — коэффициент фильтрации намытого грунта, *м/сут*; m' — коэффициент водоотдачи грунта; τ — коэффициент, равный

$$\tau = \tau_1\tau_2, \qquad (8\text{-}4)$$

где τ_1 — коэффициент использования земснаряда, т. е. число часов работы снаряда в сутки, поделенное на 24; τ_2 — коэффициент одновременности намыва, равный отношению смоченной площади карты при намыве к полной площади карты.

Максимальное значение ΔH:

$$(\Delta H)_{макс} = \frac{k(1-\tau)}{m'}. \qquad (8\text{-}5)$$

Следовательно, допустимая интенсивность намыва должна удовлетворять критерию

$$\Delta H \leqslant (\Delta H)_{макс}. \qquad (8\text{-}6)$$

Расход инфильтрации

$$q_и = \frac{q}{L}, \qquad (8\text{-}7)$$

где L — ширина поверхности намыва; q — удельный фильтрационный расход на 1 *м* длины плотины. Расход q, согласно рекомендации В. М. Шестакова, вычисляется по следующим приближенным формулам[1]:

[1] С. И. Горюнов в работе [47] рекомендует менее точную формулу.

для водонепроницаемого основания

$$q = \frac{h_в}{m + 0{,}5}; \qquad (8\text{-}8)$$

для водопроницаемого основания большой мощности

$$q = \frac{h_в}{1{,}2m + 0{,}5}, \qquad (8\text{-}9)$$

причем $h_в$ — высота поверхности высачивания на откосе; m — коэффициент откоса.

В работе [47] рассматриваются другие случаи намыва. Из приведенной же частной схемы вытекает, что в период производства работ по намыву плотины желательно вести наблюдения за кривой депрессии и на каждом этапе возведения плотины определять высоту поверхности высачивания $h_в$, которая предварительно определяется расчетом при проектировании производства работ.

Определение фильтрационного расхода у подошвы откоса дает возможность уточнить зависимость (8-3), введя в нее эмпирический корректив для данных производственных условий.

Для оценки водопроницаемости тела плотины важно получить коэффициенты фильтрации намытого массива в вертикальном и горизонтальном направлениях, так как намытый грунт обладает анизотропной водопроницаемостью, и величина коэффициента фильтрации в горизонтальном направлении больше той же величины в направлении вертикальном.

При устройстве цементационных завес [3] бурятся и опробываются на водопоглощение, а затем цементируются скважины первой очереди или же скважины, располагающиеся на 10—15 *м* друг от друга. Полученные при этом данные о водопоглощении отличаются гораздо большей точностью, чем данные изысканий при обосновании проекта. Проводимые во время производства работ исследования позволяют уточнить параметры завесы, т. е. ее глубину, шаг скважин и т. д. Опытные скважины испытываются на удельные водопоглощения по зонам при трех ступенях давления до получения установившегося фильтрационного расхода.

Имеется ряд способов опытных нагнетаний зон с последующей цементацией [3]. Эти способы отличаются друг от друга порядком выполнения работ и их очередностью. Таким образом, опробование цементационных скважин на водопоглощение тесно связано с современной технологией цементационных работ.

По окончании работ по выполнению противофильтрационных завес производятся испытания зон расположения завес на водопоглощение или на откачку из скважин для определения коэффициента фильтрации укрепленной породы. При этом как величины водопоглощения, так и коэффициентов фильтрации должны соответствовать намеченным в проекте данным.

Подобные исследования проводились, например, в основании плотины Сэр-Понсон во Франции, где плотность завесы в песчаных грунтах по проекту должна была обеспечивать величину коэффициента фильтрации 10^{-4} *см/сек*. По данным опытных откачек из контрольных скважин коэффициент фильтрации оказался равным в среднем $1{,}9 \cdot 10^{-4}$ *см/сек*. Контрольные скважины были расположены в центре 12-рядной завесы, а также между рядами и на оси 2-го ряда.

Нередко в период эксплуатации сооружений производятся дополнительные работы в связи с их переоборудованием, укреплением и ремонтом. Не останавливаясь на подобных случаях, отметим лишь, что исследования фильтрации в основаниях массивных гидросооружений иногда приводят к решению произвести дополнительную цементацию. Типичным случаем в практике подобных работ была цементация при восстановлении поврежденной во время войны Днепровской плотины. Подробные исследования фильтрации выявили слабые места существующей завесы. Дополнительная цементация, произведенная при напоре до 37,5 *м*, снизила противодавление, как это следовало из наблюдений за уровнями воды в пьезометрических скважинах, пробуренных после дополнительной цементации. Этот интересный случай восстановления завесы под напором описан в ряде работ [42, 43].

Важно в подобных случаях вести непрерывные наблюдения за противодавлением. При неблагоприятных условиях под влиянием фильтрации возможно продвижение цементационной завесы в сторону нижнего бьефа, что наглядно сказывается на эпюрах противодавления.

При наличии в породе основания крупных трещин наблюдались случаи, когда цементационные работы в одном пролете плотины давали основной эффект в других пролетах.

Как известно, цементация песчано-гравийных грунтов не дает высокой плотности ввиду трудности заполнения пор инъекционным материалом. Поэтому в ряде случаев необходимо иметь натурные данные о допустимых градиентах суффозии зацементированных грунтов. Общая методика исследований зацементированного грунта на суффозию в полевых условиях недостаточно разработана. Имеются попытки исследования суффозии при помощи налива воды в шурф. В соседнем наблюдательном шурфе, отделенном от первого перегородкой из зацементированного грунта, производятся наблюдения за выносом частиц грунта при различных градиентах напора. Конечно, такое исследование дает возможность судить о суффозионной устойчивости неглубоких зон.

При натурном исследовании фильтрации зацементированного песчано-гравийного грунта в основании плотины в Китае была применена схема, изображенная на рис. 8-6 [3]. Насыпанная над исследуемым грунтом кольцевая дамба из глинистого

грунта образовала резервуар, окруженный водой. При заполнении водой резервуара происходила фильтрация в основании дамбы под напором H. Средний градиент напора под подошвой дамбы шириной L был $I=H/L$. Оказалось, что градиент напора, при котором начинается опасный вынос грунта, лежал в пределах $I=4{,}6 \div 7{,}1$.

Подобные исследования в натурных условиях имеют в известной мере лабораторный характер, но, будучи связаны с реальными геологическими и производственными условиями, дают достаточно надежные критерии безопасности в отношении фильтрации.

В качестве примера можно привести опыт сооружения водохранилища Макнери на р. Колумбии в США, где для ограждения населенных мест возводились дамбы с зубом из глинистого

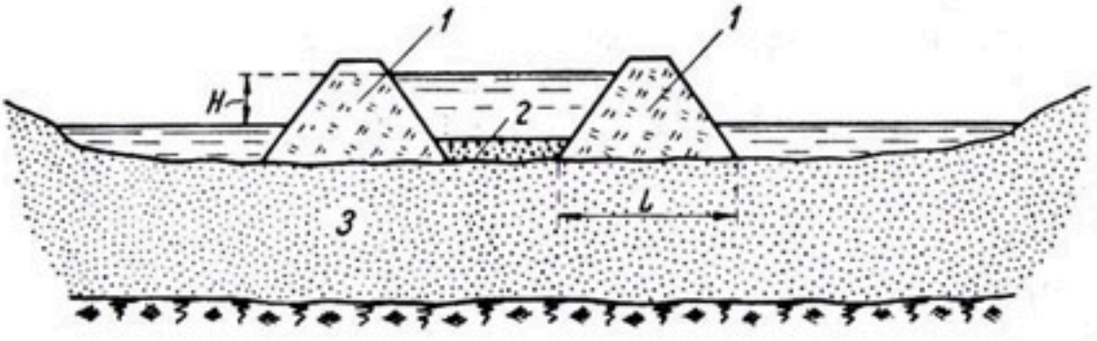


Рис. 8-6. Схема полевых опытов по исследованию суффозии цементированного грунта.

1 — кольцевая дамба; *2* — песчаный слой; *3* — цементированный грунт.

материала в основании. Для исследования эффективности зуба на месте строительства был сооружен опытный котлован, огражденный траншеей, заполненный материалом, из которого должен был быть устроен зуб. Внутри котлована был колодец, из которого откачивалась грунтовая вода. Эти исследования позволили получить надежные характеристики эффективности зуба [134].

Исследования фильтрации в период производства работ являются кратковременными и зависят не только от тех факторов, которые определяют состав натурных исследований в период эксплуатации сооружений, но и от метода производства строительных работ.

В ряде случаев натурные исследования в период строительства приобретают специфический характер. Для примера укажем на строительство в районе вечной мерзлоты. При строительстве гидроузла на р. Ирелях (приток р. Вилюй) [19] земляная плотина отсыпалась из естественного грунта, но с последующим промораживанием. Значительные сложности при возведении плотины высотой 20 *м* вызывал подрусловой талик, в котором сохраняется фильтрация межмерзлотных грунтовых вод. Отепляющее действие потока грунтовых вод может вызвать

недопустимое оттаивание основания плотины. Поэтому, наряду с исследованиями температурного режима основания, большое значение имели наблюдения за фильтрацией грунтовых межмерзлотных напорных вод. Подрусловой грунтовой поток создавал затруднения при осуществлении мерзлотной завесы в период до смыкания льдогрунтовых цилиндров, омывая их водой. При создании указанной завесы велись систематические наблюдения за напорами по обеим сторонам завесы. Такие наблюдения позволяли определить по разности напоров смыкание льдогрунтовых цилиндров и наличие в завесе «окон».

Как было сказано выше, мировой опыт гидротехнического строительства доказывает необходимость проведения фильтрационных исследований в период производства работ с точки зрения надежности и экономичности возводимых сооружений. Имеются примеры существенных коррективов проектов гидросооружений, вносимых на основании натурных исследований и дающих значительную экономию средств.

§ 8-4. Исследование фильтрации из водохранилищ

При создании водохранилищ баланс грунтовых вод резко изменяется. Река, бывшая до сооружения плотины стоком грунтовых вод, после возведения плотины становится частично источником питания их.

Потери воды на фильтрацию из водохранилищ могут явиться причиной заболачивания окружающих водохранилище пониженных участков. Но в ряде случаев, именно когда водохранилища создаются для накопления воды и последующего ее использования с целью орошения или утилизации водной энергии, потери воды из водохранилищ могут привести к значительному экономическому ущербу.

Иногда вода, собранная в водохранилище, является настолько ценной, что представляется выгодным каптировать фильтрующуюся из водохранилища в грунт воду и перекачивать ее в верхний бьеф. Такой случай имелся на Черепетьской ГРЭС. Исследования В. М. Насберга показывают, что путем глубинной откачки и возврата грунтовых вод в водохранилище Храмгэс-1 можно увеличить выработку энергии гидростанции на 17% [105].

Потери на фильтрацию из водохранилища происходят через дно и борта водохранилища и через земляные плотины. Фильтрация через дно водохранилища может происходить в нижележащие водоносные горизонты и под подошвами гидротехнических сооружений. В последнем случае грунтовая вода в значительной степени просачивается через дно нижнего бьефа (рис. 8-7).

Вода, фильтрующаяся через борта водохранилища, растекается в стороны от бортов (рис. 8-8), часть потока, обтекая береговые примыкания гидросооружений, выходит в нижний

бьеф через береговые склоны (рис. 8-9). Естественный грунтовой поток при этом оттесняется и, в зависимости от разности отметок свободной поверхности естественных грунтовых вод и уровня воды в водохранилище, поток грунтовых вод, обтекающий береговой устой, занимает более или менее значительную площадь, измеряемую иногда десятками квадратных километров.

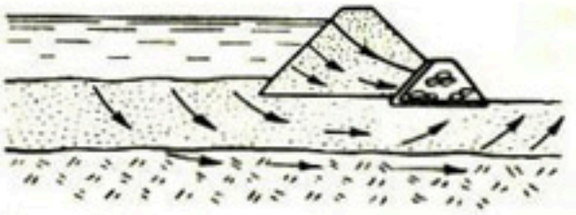


Рис. 8-7. Схема фильтрации из водохранилища через тело и основание плотины.

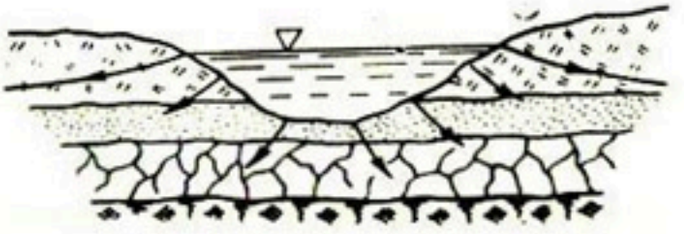


Рис. 8-8. Схема фильтрации через дно и борта водохранилища.

Остановимся на вопросе о развитии подпора грунтовых вод вдали от береговых примыканий плотины. Если до наполнения водохранилища имелся приток грунтовых вод к реке, то при повышении уровня воды в водохранилище через более или менее продолжительное время естественная кривая депрессии деформируется, как показано на рис. 8-10, *а*. На рисунке показаны последовательные положения кривой депрессии. В конце процесса развития подпора устанавливается кривая депрессии, форма которой свидетельствует о возобновлении питания водохранилища естественными грунтовыми водами. В этом случае уровни естественных грунтовых вод повышаются.

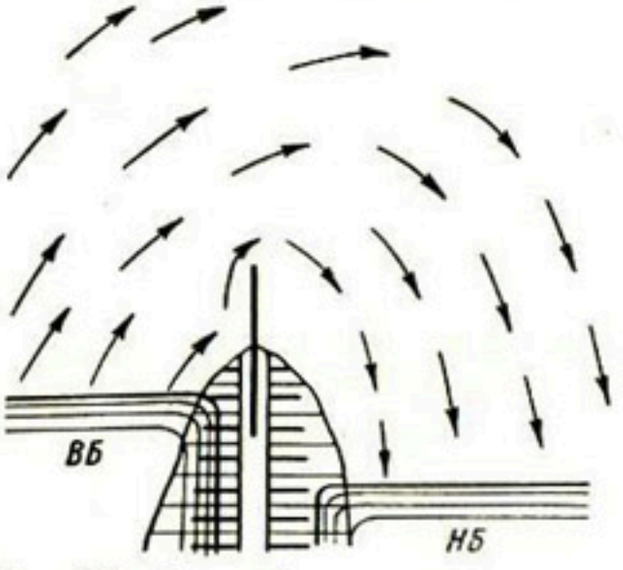


Рис. 8-9. Схема фильтрации в береговом примыкании земляной плотины.

В других случаях водохранилище, бывшее ранее стоком естественных грунтовых вод, становится источником питания. Это происходит при условии, что уровень воды в соседней долине ниже подпертого уровня воды в водохранилище. На рис. 8-10, *б* показан случай, когда река до сооружения водохранилища питалась грунтовыми водами за счет инфильтрации с поверхности земли. После наполнения водохранилища она стала источником питания соседней с ней реки. Последовательные положения кривой депрессии показаны на рисунке.

Сказанное выше о характере фильтрации из водохранилищ позволяет наметить способы замера фильтрационных потерь. Определение потерь на фильтрацию из водохранилищ пред-

ставляет зачастую трудную задачу. В особенности трудно определить ту часть потерь на фильтрацию, которая идет на питание нижележащих горизонтов. Обратимся сначала к определению фильтрационных расходов отдельных зон грунтового потока, названных выше.

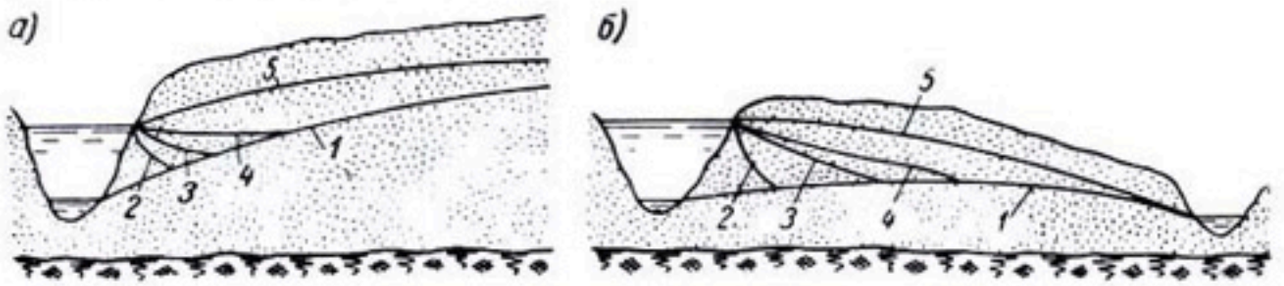


Рис. 8-10. Схемы развития подпора грунтовых вод от водохранилища.
1 — кривая депрессии естественных грунтовых вод до подпора; *2, 3, 4* — кривые депрессии при развитии подпора; *5* — кривая депрессии в конце процесса развития подпора.

Часть потерь на фильтрацию из бортов водохранилища можно определить по карте гидроизогипс, построенной на основании замеров уровней воды в пьезометрах, расположенных на берегах водохранилища. Для определения фильтрационного расхода необходимо иметь численные значения коэффициентов фильтрации пород и формы слоев, слагающих область фильтрации. Если на полученной карте гидроизогипс можно провести линии тока так, чтобы фильтрацию между ними можно считать плоской, как, например, на рис. 8-11, то к таким «лентам тока» можно применить соответствующую теоретическую формулу, из которой



Рис. 8-11. Выделение фрагмента для определения потерь на фильтрацию.

$$q = \frac{k\left(h_1^2 - h_2^2\right)}{2l}, \qquad (8\text{-}10)$$

где h_1 и h_2 — глубины потока в сечениях ab и cd (рис. 8-11); l — длина участка между расчетными сечениями.

В случае слоистых грунтов

$$q = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l}, \qquad (8\text{-}11)$$

где φ_1 и φ_2 — значения функции Гиринского в сечениях ab и cd

$$\varphi = \sum_{i=1}^{n} k_i T_i (h - z_i), \qquad (8\text{-}12)$$

k_i и T_i — коэффициент фильтрации и мощность i-го пласта; h — глубина в соответствующем сечении потока; z_i — расстояния от центров слоев до плоскости водоупора.

Конечно, определение фильтрационного расхода при помощи теоретических формул может дать лишь грубо приближенное значение расхода, так как часто линии тока будут искривлены в плане. Тогда фильтрационный расход можно определить по методу ЭГДА на модели плановой фильтрации [9]. Кстати, проведение опытов по методу ЭГДА дает возможность получить недостающие гидроизогипсы на плане потока и сравнить экспериментальные данные с натурными.

Фильтрация через дно водохранилища может быть исследована при помощи специальных приборов — фильтромеров [45, 105], которые дают возможность количественно определить скорость фильтрации в различных точках дна водохранилища, а затем подсчитать общий фильтрационный расход через дно.

Локальные утечки воды через дно водохранилища в местах расположения трещин, карстов и сильно фильтрующих пластов могут быть обнаружены при помощи геофизического метода естественных электрических полей, возникающих вследствие разных причин и, в частности, вследствие фильтрации грунтовых вод. Над зоной интенсивной фильтрации возникает отрицательная аномалия поля электрических потенциалов, т. е. резкое уменьшение потенциала, определяемое специальными приборами [118].

Определение части фильтрационного расхода в зоне обтекания грунтовыми водами береговых примыканий теоретическим путем, например по формуле Дюпюи, является неточным, так как в этих зонах линии тока сильно искривлены. Надо полагать, что экспериментальное исследование, например по методу ЭГДА, даст более точные значения расхода. При этом в точках электропроводной модели, которые соответствуют наблюдательным скважинам, можно задать потенциалы, полученные из натурных наблюдений.

Если в зоне выхода грунтовых вод в нижний бьеф имеется береговой дренаж, то можно измерить фильтрационный расход в дренажных коллекторах. При небольшом расходе его можно замерить объемным способом, направляя воду в мерный сосуд. При значительном расходе применяются мерные водосливы. При наличии гидравлической связи между верхним и нижними водоносными горизонтами некоторая часть грунтовых вод фильтруется через дно водохранилища в нижние напорные горизонты. Для определения этой части потерь необходимо иметь карту гидроизогипс верхнего горизонта и гидроизопьез нижних горизонтов. По этим картам определяется фильтрационный расход в пластах, слагающих основания сооружений. Для определения расхода необходимо знать коэффициенты фильтрации пластов и их мощности.

Для определения фильтрационного расхода, поступающего из дна водохранилища в нижние горизонты, необходимо знать расход $Q'_д$ естественного грунтового потока до сооружения плотины. Потери на фильтрацию через дно водохранилища:

$$Q_д = Q'_д - Q_l, \qquad (8\text{-}13)$$

где Q_l — расход естественного грунтового потока, протекающий в нижних горизонтах.

Потери на фильтрацию через тело земляной плотины обычно определяются путем измерения расхода в водосборных коллекторах или кюветах. Для этой цели применяются мерные водосливы — треугольные или трапецеидальные.

Если низовой откос плотины затоплен, то фильтрационный расход трудно определить путем непосредственного измерения. Но если глубина воды в нижнем бьефе невелика, то в случае необходимости на некотором участке плотины возводится перемычка, ограждающая часть низового откоса от нижнего бьефа и образующая небольшой пруд. В перемычке устраивается водослив или труба для пропуска в нижний бьеф фильтрационного расхода из пруда. Измеряя тем или иным путем расход через водопропускное устройство, определяем фильтрационный расход на огражденном участке фронта плотины.

В некоторых случаях установить размеры потерь на фильтрацию из водохранилищ путем измерений расходов затруднительно, тогда эти потери могут быть определены путем составления уравнений водного баланса. Таким образом были определены потери на фильтрацию из Храмского водохранилища, расположенного в горной местности, где общие потери на фильтрацию из реки и водохранилища совместно с расходом естественных грунтовых вод питают родники на склоне ущелья [177].

Фильтрационный расход Q из водохранилища связан более или менее тесной корреляционной зависимостью с отметками уровня воды в водохранилище H. В свою очередь, от величины фильтрационного расхода зависит работа гидротехнических сооружений и, в частности, их надежность. Например, увеличение Q при $H = \text{const}$ свидетельствует о развитии суффозионных явлений. От величины расхода зависит работа дренажных устройств, подтопление территорий грунтовыми водами и т. д. Поэтому, наряду с наблюдениями за уровенным режимом в районе водохранилищ измеряются и анализируются величины фильтрационных расходов в различных сечениях грунтового потока и стоках в виде дрен и сосредоточенных выходов потока на поверхность земли.

Имеется ряд методов исследования фильтрации из водохранилищ. Наиболее распространен метод сопоставления графиков изменения во времени фильтрационного расхода $Q = f(t)$ и уровня воды в водохранилище $H = f(t)$. Подобные графики

показаны на рис. 8-12. Этот метод обычно подтверждает взаимосвязь уровней воды в водохранилище с фильтрацией. Отсутствие такой связи обычно объясняется наличием необнаруженных источников фильтрации. График изменения фильтрационного расхода $Q=f(t)$ часто бывает сдвинут во времени по отношению к графику изменения уровня воды в водохранилище $H=f(t)$. Чем меньше такой сдвиг, тем ближе находится контрольный источник для измерения расхода к месту входа грунтовых вод.

При заполнении водохранилища процесс фильтрации в земляных сооружениях, а в особенности в основаниях гидросооружений, может быть сильно осложнен явлениями кольматации трещин, образования тонкого покрова наносов в верхнем бьефе, явлениями выноса грунта и т. д.

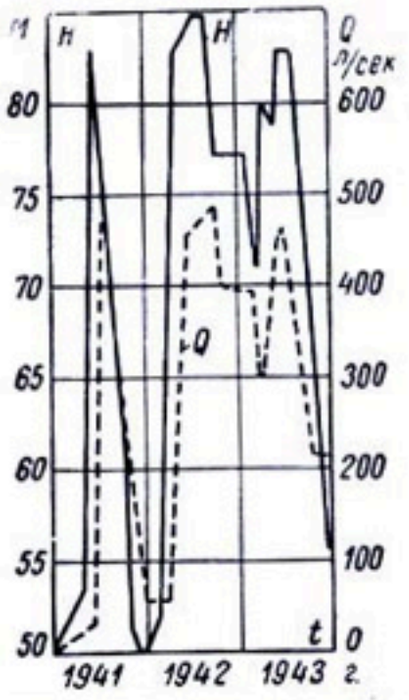


Рис. 8-12. Графики изменения потерь на фильтрацию и уровня верхнего бьефа.

Постоянное увеличение расхода в контрольных источниках при неизменном уровне воды в водохранилище, а также непрекращающийся выход загрязненной воды свидетельствуют о разрушительном действии фильтрации, а следовательно, о необходимости срочной разработки защитных мероприятий. В частности, можно рекомендовать поднятие уровня воды в водохранилище производить замедленно. При наличии размываемых пород может возникнуть необходимость задержки подъема уровня или даже его снижения. Указанные мероприятия, составляя содержание специального раздела гидротехники, упоминаются здесь, конечно, только как тесно связанные с дальнейшими натурными исследованиями фильтрации. Заметим, что в подобных ответственных случаях к натурным исследованиям необходимо привлекать специальные институты.

В слабопроницаемых породах стабилизация процесса фильтрации происходит весьма медленно, иногда несколько месяцев. В этих случаях проведение натурных исследований занимает длительное время.

График зависимости фильтрационного расхода от отметки горизонта воды в водохранилище $Q=f(t)$ может иметь сложную форму, а также изменяться во времени. Сложность формы графика обусловливается наличием в основании сооружения и в берегах пластов с различной водопроницаемостью. Изменение же этого графика во времени зависит в основном от двух факторов: от указанной выше медленной стабилизации процесса фильтрации в слабопроницаемых грунтах и от изменения водопроницаемости водопроводящих пластов вследствие кольма-

тации и суффозии. Медленность стабилизации фильтрации объясняется в ряде случаев наличием упругого режима фильтрации в напорных пластах, при котором вследствие значительного давления происходят сжатие грунтовой массы и уменьшение объема пор.

Зависимость $Q=f(t)$ в условиях влияния указанных факторов не является однозначной. На рис. 8-13 показан график подобной зависимости. Стрелками обозначено направление изменения уровня в водохранилище. Как видно из графика, при одном и том же значении H расход Q зависит от направления изменения уровней (подъем и спад).

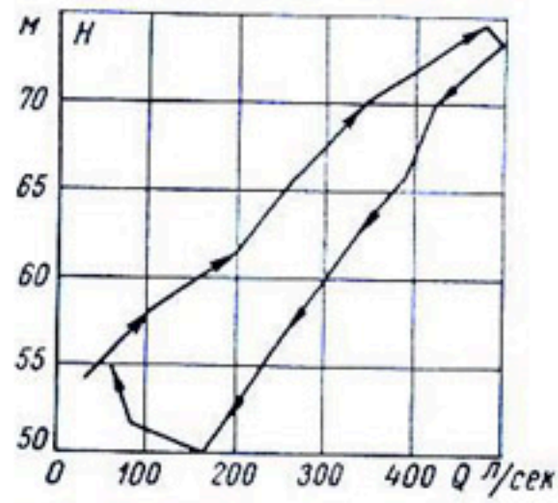


Рис. 8-13. Графики зависимости потерь на фильтрацию от уровня верхнего бьефа в течение года.

Имеется еще ряд факторов, подобных указанным. К ним относятся, например, влияние испарения, сказывающееся при удалении источника от сооружения, влияние консолидации (уплотнения) грунта в намытых земляных сооружениях, которое иногда продолжается достаточно долго. Следует еще учесть, что коэффициент фильтрации зависит от температуры воды, что приводит к необходимости измерения температуры при натурных исследованиях, а также приведения к постоянной температуре графика $Q=f(H)$. Как следует из формулы (2-8), коэффициент фильтрации изменяется обратно пропорционально кинематическому коэффициенту вязкости жидкости. Таким образом, если коэффициент фильтрации и кинематический коэффициент вязкости при температуре t_1 будут k_1 и ν_1, а при t_2 соответственно k_2 и ν_2, то, согласно формуле (2-8),

$$\frac{k_1}{k_2}=\frac{\nu_2}{\nu_1}$$

и

$$k_1=\frac{\nu_2}{\nu_1}k_2. \qquad (8\text{-}14)$$

Соответствующие указанным температурам расходы будут находиться в том же отношении, что и коэффициенты фильтрации, т. е.

$$Q_1=\frac{\nu_2}{\nu_1}Q_2. \qquad (8\text{-}15)$$

Пользуясь этой формулой, можно привести фильтрационные расходы, замеренные в различное время, к одной температуре. Часто фильтрационный расход в значительной степени зависит

от степени раскрытия швов и трещин в сооружениях. Так как степень раскрытия швов, в свою очередь, сильно зависит от температуры, то температурные колебания в теле массивных сооружений могут сильно влиять на фильтрационный расход. Поэтому при остывании бетонных сооружений может наблюдаться увеличение фильтрационного расхода. По ориентировочным расчетам В. П. Киракосова [74], максимальное раскрытие трещин может быть сильно сдвинуто во времени по отношению к периоду минимальных температур.

§ 8-5. Натурные исследования фильтрации под бетонными водоподпорными сооружениями

При проектировании массивных бетонных плотин, русловых гидроэлектростанций и судоходных шлюзов на долю фильтрационного расчета приходится в основном определение противодавления на подошву сооружения, а также давления в различных точках области фильтрации, фильтрационного расхода под сооружением и в обход его, скоростей фильтрации и градиентов напора в различных точках области фильтрации, в частности при выходе грунтовых вод в дренажи или в нижний бьеф. Таковы основные вопросы фильтрационного расчета.

Те же вопросы освещаются путем натурных исследований в построенных гидросооружениях. В ряде случаев, помимо натурных исследований этих вопросов, возникает необходимость изучения в натурных условиях развития химической суффозии в основаниях сооружений, работы обратных фильтров и т. д.

Следует подчеркнуть, что жизнь гидротехнических сооружений зависит от их конструкции, гидрогеологических условий, а также от качества производства работ. Поэтому как программа натурных исследований, так и проект пьезометрической сети в гидросооружениях не имеют стандартного характера и отвечают лишь общим принципам и практическим данным, основанным на аналогии природных условий.

В состав систематических наблюдений за фильтрацией в бетонных сооружениях входят наблюдения за уровнями воды в верхнем и нижнем бьефах, за уровнями воды в пьезометрах, определение температуры воды в бьефах и скважинах, определение фильтрационного расхода в оборудованных для этой цели пунктах. Кроме того, должны систематически проводиться визуальные наблюдения за очагами фильтрации. Если в основании сооружения имеются растворимые вещества, то к названным наблюдениям добавляются еще наблюдения за химическим составом грунтовых вод.

К числу эпизодических исследований относятся определение коэффициентов фильтрации пород оснований и определение скоростей фильтрации. Этим вопросам посвящены главы 4 и 5.

Замер уровней в пьезометрах практически производится обычно один раз в 7—10 дней, при значительных колебаниях уровня в верхнем бьефе замеры производятся чаще. Данные по замерам фиксируются в журналах, и по ним строятся кривые изменения уровней воды в пьезометрах и бьефах, кривые изменения напора по контуру флютбета и эпюры противодавления в поперечных створах гидросооружений, а также кривые напоров в продольных створах.

Условия фильтрации в отдельных пьезометрических створах гидросооружений часто бывают различными, даже в случаях, когда основания отдельных секций сложены одинаково. В таких случаях весьма наглядное представление об общей картине фильтрации дает карта гидроизогипс. Она позволяет судить об эффективности противофильтрационных конструкций, в особенности в местах примыкания бетонных сооружений к земляным сооружениям или к берегам, а также о неоднородности оснований и в ряде случаев о дефектах производства работ.

На границах планового очертания бетонных сооружений гидроизопьезы переходят в гидроизогипсы.

При наличии колебаний уровней воды в бьефах, вызванных суточным регулированием, изменение давления в пьезометрах выражается сложными кривыми, в общем следующим изменениям напора. При проведении натурных исследований сооружений Горьковского гидроузла Московским филиалом института Оргэнергострой ввиду быстрого изменения уровней применялись самописцы для записи показаний пьезометров или же наблюдения за уровнями в пьезометрах велись круглосуточно [55]. Оказалось, что изменения показаний пьезометров подобны изменениям напора, но сдвинуты по фазе на 0,5—2 *ч*. Имеется ряд причин, влияющих на показания пьезометров, заложенных в основаниях гидросооружений. Изменение положений горизонтов воды в верхнем и нижнем бьефах — главная из этих причин. Но при отсутствии других влияний эпюра приведенных напоров (§ 2-11) при изменении положений горизонтов воды в бьефах не изменяется в данном створе. Изменение формы названной эпюры может произойти за счет упругого режима фильтрации, при котором изменение отметки горизонта в верхнем бьефе вызывает соответствующее изменение уровня воды в пьезометрах с некоторым запозданием.

Следует иметь в виду, что при наличии безнапорных пьезометров на их показания оказывает влияние их емкость. При наличии слабопроницаемых грунтов применение подобных пьезометров может существенно исказить результаты исследований.

В грунте основания нередко происходят перемещения частиц под влиянием фильтрационных сил (фильтрационные деформации). Вследствие этого в одних зонах коэффициент

фильтрации с течением времени увеличивается, а в других уменьшается.

Увеличение коэффициента фильтрации может иметь место в трещиноватых скальных породах при размыве заполнителей трещин. Такое же влияние оказывает на коэффициент фильтрации вынос из грунта основания растворимых веществ (химическая суффозия). Изменения коэффициента фильтрации основания, естественно, влияют на показания пьезометров и деформируют эпюру приведенных напоров.

Таким же образом влияют на показания пьезометров и эпюры приведенных напоров нарушения, происходящие в конструктивных элементах гидросооружений. К таким нарушениям относятся, например, выщелачивание цементационной завесы, засорение обратных фильтров, неравномерная осадка сооружения, образование трещин в понуре и т. п.

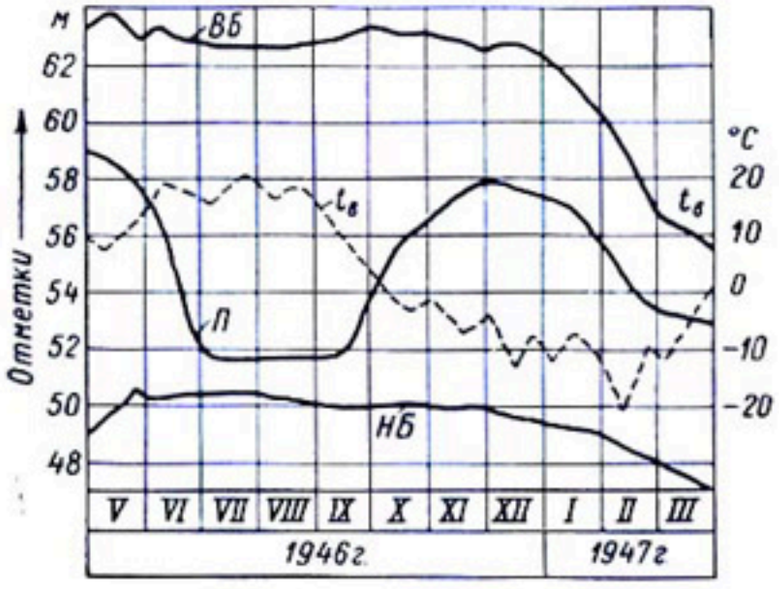


Рис. 8-14. Кривые изменения уровней бьефов *ВБ* и *НБ*, воды в пьезометре *П* и температуры воздуха $t_в$.

Описывая исследования бетонных гидросооружений, В. П. Киракосов [74] подробно останавливается на анализе показаний пьезометров, причем оказывается, что кривые показаний некоторых пьезометров не соответствуют кривым изменения уровня воды в водохранилище, но явно зависят от температуры воздуха (или воды в водохранилище). При этом чем выше температура, тем (с некоторым сдвигом во времени) ниже уровни воды в пьезометрах. Колебания этих уровней, обусловленные температурным режимом, при практически постоянных отметках горизонтов воды в обоих бьефах достигали от 3 до 10 *м*.

На рис. 8-14 показаны кривые изменения уровней воды в верхнем (*ВБ*) и нижнем (*НБ*) бьефах, уровня воды в пьезометре *П*, расположенном у оснований глиняного и бетонного зубьев, близ сопряжения понура с плитой водобоя, а также кривая изменения температуры воздуха $t_в$. Из приведенных кривых следует, что уровень воды в пьезометре, как сказано выше, не зависит от уровня воды в верхнем бьефе, а зависит от температуры воздуха. Эта зависимость объясняется образованием щели между плитой водобоя и понуром, которая увеличивается при понижении температуры. Напор близ щели увеличивается,

и уровень воды в близко расположенном пьезометре повышается. При повышении температуры щель закрывается, и уровень воды в пьезометре понижается.

Если в основании гидросооружения имеется относительно сильно проницаемый горизонт, то в этом горизонте закладываются пьезометры для наблюдения за напорами. Наличие значительных по величине напоров в таком горизонте является причиной повышения давления на подошву сооружения, а в некоторых случаях представляется опасным в отношении устойчивости вышележащего пласта в зоне выхода грунтового потока в нижний бьеф. В этом пласте могут создаваться большие градиенты напора, приводящие к выпору части грунта или к образованию ходов сосредоточенной фильтрации — родников.

Для снятия напора в подобных пластах устраиваются вертикальные дренажные скважины, из которых вода изливается самотеком. В зоне расположения скважин для оценки их работы необходимо иметь наблюдательные скважины, в которых систематически замеряются уровни воды. Систематически замеряются также дебиты скважин. Небольшие радиусы действия скважин свидетельствуют о сопротивлении засоренных фильтров.

Если имеется совершенная скважина в напорном пласте мощностью T и с коэффициентом фильтрации k, то величина понижения в нормально действующей скважине

$$S = 0{,}37 \frac{Q}{kT} \lg \frac{r}{r_0}, \qquad (8\text{-}16)$$

где r_0 — радиус скважины; r — расстояние до некоторого сечения с напором h, причем $S = h - h_0$; h_0 — глубина воды в скважине.

Обозначив правую часть уравнения (8-16) через $f(Q)$, будем иметь в случае неисправно работающего фильтра

$$S > f(Q).$$

Для повышения дебита скважин производится откачка из них воды, благодаря чему близ фильтров возникают большие градиенты напора и фильтры очищаются. Производятся также промывка посредством эрлифта и искусственное повышение давления, благодаря чему дебит скважин возрастает. На рис. 8-15 показан график дебита одной из разгрузочных скважин, расположенных у земляной плотины Цимлянского гидроузла [73]. Как видно из рисунка, после прочистки скважины и смены фильтра в 1957 г. дебит ее сильно увеличился.

Обычно эксплуатационные наблюдения производятся за работой каждой скважины. Измеряются дебит скважины, количество отложившихся в ней частиц, вынесенных грунтовым потоком, производится нивелирование отметок устья скважины. Ведутся также визуальные наблюдения за участком дренажного лотка прилегающего к скважине, и за появлением новых

сосредоточенных выходов грунтовых вод в окрестности скважины. Определяются расходы имеющихся родников, и оценивается количество вынесенного из них грунта.

Нередко встречаются примеры неэффективной работы разгружающих скважин, так что наблюдения за их работой имеют существенное значение в комплексе натурных исследований фильтрации.

По имеющимся наблюдательным скважинам строятся гидроизопьезы дренируемого напорного горизонта. Карты гидроизопьез позволяют выявить опасные в отношении суффозии и выпора участки. По этим картам можно построить изолинии градиентов напора и коэффициентов устойчивости грунта против выпора. Существенно иметь карты гидроизопьез до и после промывки скважин для оценки влияния промывки.

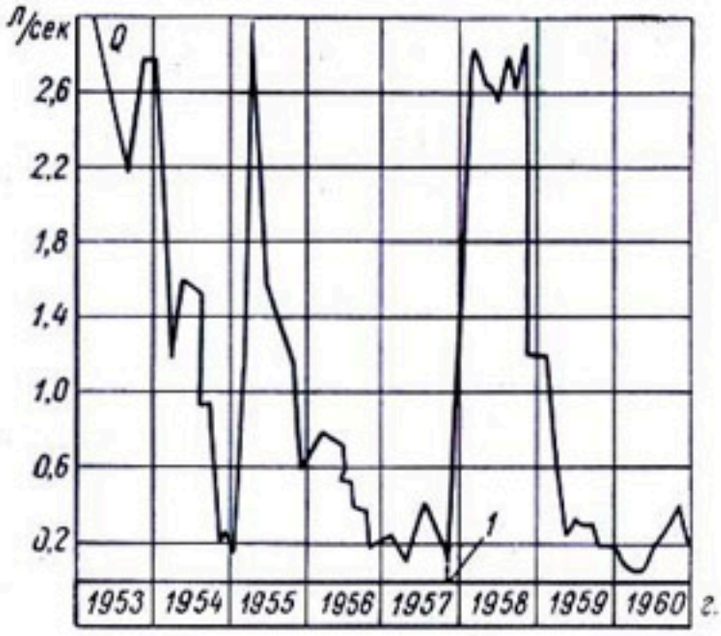


Рис. 8-15. График дебита скважины.
1 — момент смены фильтра.

В настоящее время эффект кольматации водохранилища в отношении уменьшения фильтрации под гидросооружениями еще не может с достаточной точностью оцениваться расчетом, в особенности это относится к естественной кольматации.

Эффективность естественной кольматации грунта оснований гидросооружений зависит от содержания отлагающихся перед сооружением наносов. При исследовании фильтрационного режима Уч-Курганского гидроузла наблюдалось заметное падение противодавления в водосливной плотине во время прохождения весеннего паводка 1962 г. При этом напоры под верховым зубом снизились на 1—3 *м* [58].

В результате кольматации улучшаются, конечно, и другие показатели: происходит уменьшение фильтрационного расхода, скоростей фильтрации под гидросооружением и т. д. Важнейшим показателем эффективности кольматации является эпюра напоров под подошвой фундамента, а также под понуром. О влиянии кольматации на эпюру напоров сказано в § 8-7.

Пьезометры, расположенные неподалеку от верхнего бьефа, хорошо отражают эффект кольматации, и обработка их показаний в периоды отложения наносов представляет большой практический интерес для исследуемого сооружения. При этом для анализа процесса естественной кольматации служат гра-

фики изменения напоров в зависимости от времени $h=f(t)$. Но для более глубокого изучения этого процесса необходимо иметь данные о гранулометрическом составе наносов путем исследования проб, взятых по возможности со дна водохранилища. В ряде случаев процесс кольматации не является односторонним. После прохождения паводковых вод, изобилующих наносами, под влиянием фильтрации может происходить промыв отложившихся в аллювиальном грунте мелких частиц, и противофильтрационный эффект кольматации уменьшается. В практике, однако, есть достаточное количество примеров неуменьшающегося эффекта кольматации [28].

В настоящее время в литературе имеется достаточно сведений о дренирующем действии бетонных сооружений, основанных на глинистых грунтах, коэффициент фильтрации которых на 1—2 порядка ниже коэффициента фильтрации бетона. При таком соотношении коэффициентов фильтрации грунта основания и бетонного массива сухая потерна в массиве работает как дрена, значительно снижая напоры под сооружением. Примеры такого рода приведены в § 8-7.

Опыт натурных исследований показывает влияние многих других факторов на фильтрационный режим напорных гидросооружений. К ним относится химический режим и газоносность. Для бетонных гидротехнических сооружений, а также для цементационных завес весьма важным условием долговечности является отсутствие агрессивных вод. Определение признаков и норм агрессивности воды основано на многочисленных исследованиях [3] и отражено в специальной инструкции.

§ 8-6. Пример исследования состояния суффозионно-неустойчивых оснований плотин

Исследование суффозионно-неустойчивых оснований плотин относится к наиболее ответственным и сложным фильтрационным и суффозионным исследованиям. Методика проведения натурных наблюдений за состоянием таких оснований, а также методика обработки и анализа результатов этих наблюдений получили развитие только в самые последние годы в связи со строительством и возведением гидросооружений на основаниях, подверженных действию химической суффозии [113, 138, 164]. Эта методика уже использовалась при исследованиях на конкретных объектах и дала практически интересные результаты.

В качестве примера анализа состояния основания при наличии растворимых включений можно привести результаты исследований, проводившихся на Камской ГЭС по разработанной во ВНИИГ методике. Эти исследования являются достаточно типичным примером, характеризующим общее направление исследований фильтрации в основаниях, подверженных химической суффозии.

Камский гидроузел, расположенный на р. Каме вблизи г. Перми, возведен на загипсованных полускальных трещиноватых породах. Содержание гипса в этих породах возрастает по мере удаления от дневной поверхности от 1,0—1,5% в верхних слоях, сложенных породами песчанико-глинистого комплекса, до 30—40% в породах так называемого среднего водоупора, представленных сильно загипсованными мергелями и до-

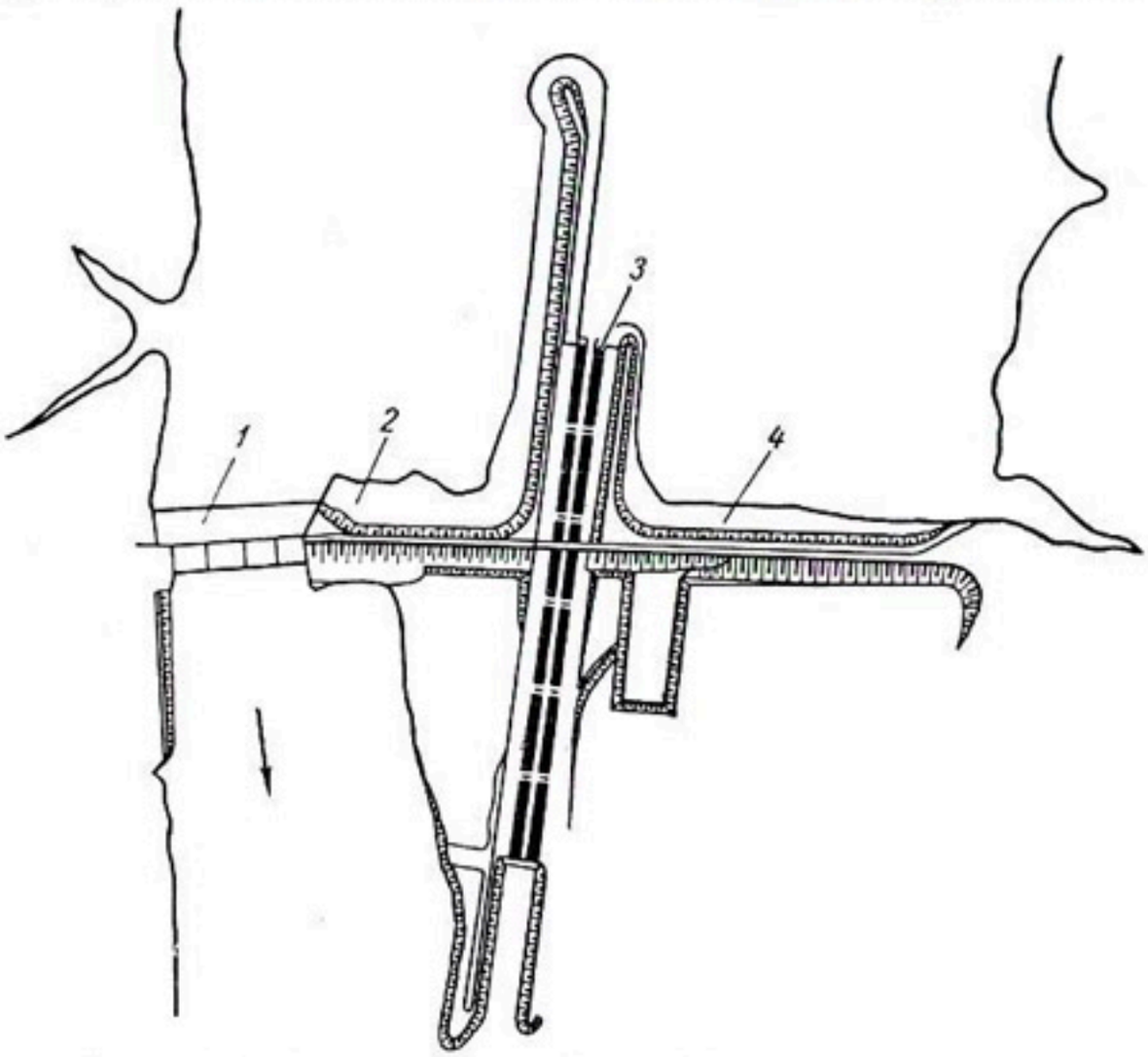


Рис. 8-16. Схематизированный план Камского гидроузла.

1 — водосливная плотина, совмещенная со зданием ГЭС (ВГЭС); *2* — русловая земляная плотина; *3* — двухниточный шестикамерный шлюз; *4* — пойменная земляная плотина.

ломитами карбонатно-терригенного комплекса. На глубине около 60 *м* все эти слои подстилаются слоями чистого гипса и ангидрита. Описание геологических и гидрогеологических условий Камского гидроузла приводится в [22, 137].

В основании Камского гидроузла имеются три более или менее самостоятельных водоносных горизонта: татарский, верхне- и нижне-соликамский. Эти горизонты схематически представлены на рис. 3-13, *а*, где изображен разрез водосливной плотины, совмещенной со зданием гидростанции (ВГЭС). В камский гидроузел, кроме ВГЭС, входят две земляные плотины и двухниточный шлюз (рис. 8-16). Анализ показывает, что в наи-

более неблагоприятных условиях для развития процесса суффозии находится основание ВГЭС.

Противофильтрационная и противосуффозионная защита основания ВГЭС по проекту должна обеспечиваться с помощью длинного понура, глубокой цементационной завесы, доходящей до водоупора, и глубинного вертикального дренажа. В этом комплексе инженерных мероприятий понур и завеса предназначаются для уменьшения фильтрационного расхода в основании ВГЭС, а вертикальный дренаж служит для снятия давления и уменьшения фильтрации непосредственно под фундаментной плитой ВГЭС, а также для защиты этой части основания от химической суффозии. Последнее требование должно было выполняться путем привлечения к основанию ВГЭС высокоминерализованных вод нижних горизонтов. При этом предполагалось, что воды нижних горизонтов полностью насыщены гипсом и потому безопасны для загипсованных пород. В дальнейшем экспериментальным путем было установлено, что в условиях Камской ГЭС минерализованные воды в значительной степени сохраняют способность растворять гипс, хотя агрессивность их несколько пониженная. Таким образом, указанное выше предположение, положенное в основу проекта, подтвердилось только отчасти.

Поскольку в первые годы эксплуатации Камской ГЭС (1954—1958 гг.) наблюдалось низкое фильтрационное давление на подошву ВГЭС, то было решено не вводить в эксплуатацию вертикальный дренаж. В дальнейшем с течением времени фильтрационное давление стало постепенно возрастать, достигнув максимума в 1962 г. Соответствующий анализ показал, что основными причинами роста давления было ухудшение условий разгрузки потока в нижнем бьефе и изменение режима эксплуатации сооружения в результате ликвидации различных строительных недоделок, имевших место в первые годы эксплуатации, устранения течей пьезометров и скважин и т. д. Указанное повышение давления не удалось снять с помощью дополнительной цементации, вследствие чего вновь был поставлен вопрос о целесообразности ввода в постоянную эксплуатацию системы вертикального дренажа. В задачи исследований ВНИИГ входило определение общего состояния основания ВГЭС, решение вопроса о необходимости включения вертикального дренажа и определение условий оптимального режима работы этого дренажа. Исходными материалами для этих исследований были результаты натурных наблюдений на ВГЭС, осуществляемых гидроцехом Камской ГЭС, а также результаты некоторых исследований ВНИИ ВОДГЕО, Пермского университета и института Гидропроект.

В соответствии с принятой методикой натурные исследования фильтрационного и суффозионного режимов на ВГЭС проводятся по данным наблюдений за пьезометрическими уровнями

и дебитами пьезометров, по результатам анализа химических проб воды из пьезометров и по данным о расходах дренажных устройств. За годы эксплуатации накопилось большое количество этих данных. Кроме того, ВНИИГ с помощью радиоактивных индикаторов провел опыты по определению качества цементационной завесы.

Все имевшиеся материалы натурных наблюдений были обработаны и систематизированы в соответствии с методикой, изложенной в [114]. При этом построено большое количество графиков приведенного пьезометрического напора, планов гидроизопьез, изолиний минерализации, определена форма филь-

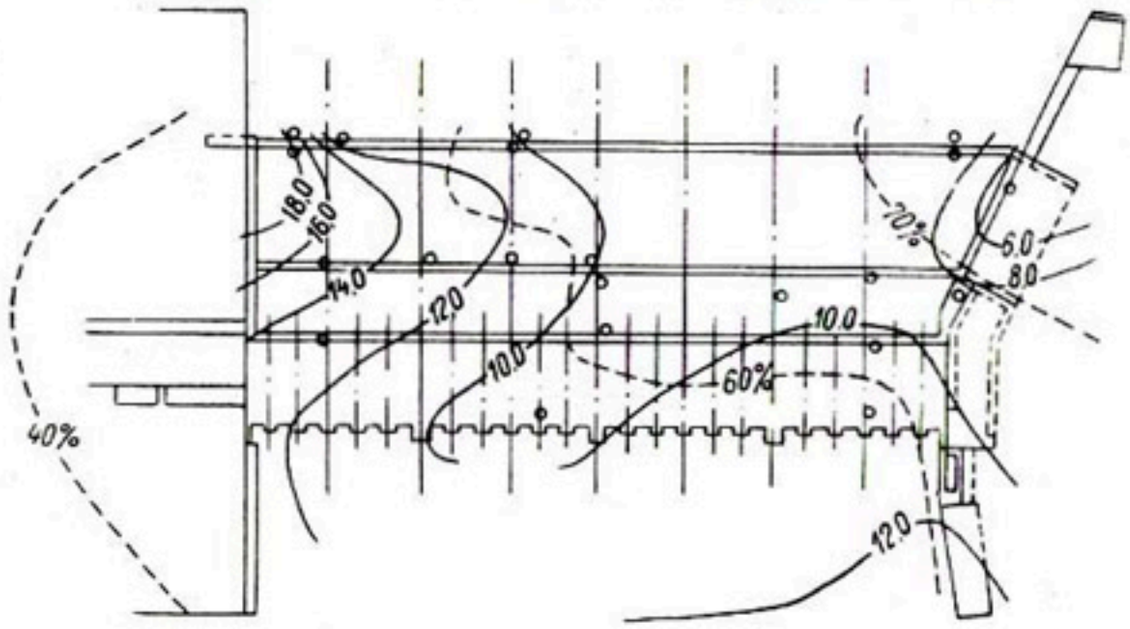


Рис. 8-17. План изолиний минерализации в нижне-соликамском водоносном горизонте Камской ГЭС.

Сплошные линии — гидроизопьезы; пунктирные — изолинии минерализации.

трационного потока в основании ВГЭС и т. д. В результате установлено следующее.

1. В основании ВГЭС происходит процесс химической суффозии. Это положение подтверждается наличием градиента минерализации вдоль направления потока во всех трех водоносных горизонтах, сезонностью химического состава потока, обнаруживаемой по результатам проб как из отдельных пьезометров, так и по осредненным данным, а также общей тенденцией к увеличению водопроницаемости пород основания. Для иллюстрации сказанного на рис. 8-17 приведен план изолиний минерализации, совмещенный с планом гидроизопьез для нижне-соликамского горизонта, а на рис. 8-18 график изменений минерализации, средневзвешенной по группе пьезометров, контролирующих нижне-соликамский горизонт основания в районе цементационной потерны. Изменения температуры воды нижних горизонтов мало зависят от времени года, а напор и, следовательно, фильтрационный расход за время между циклами отборов проб (весна — осень и осень — весна) изменяется весьма

существенно. Подобное сезонное изменение минерализации можно приписать только наличию зависимости между скоростью фильтрации и содержанием растворенных веществ в потоке, что является одним из признаков растворения.

Тенденцию к увеличению водопроницаемости пород основания можно усмотреть в уменьшении инерционности пьезометров, выявляемой при анализе графиков приведенного пьезометрического напора и данных о количестве пьезометров с возрастающим дебитом.

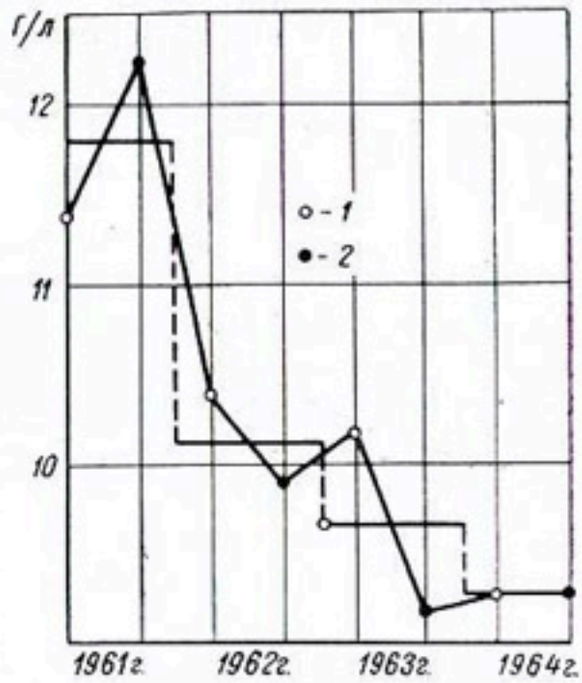


Рис. 8-18. График сезонных изменений осредненных значений минерализации по пробам воды из пьезометров нижне-соликамского горизонта в цементационной потерне.

1 — весенний отбор проб; *2* — осенний отбор проб.

2. Несмотря на наличие процесса суффозии основание ВГЭС в настоящее время находится в удовлетворительном состоянии, а количественная оценка интенсивности развития процесса суффозии в основании ВГЭС показывает, что это процесс медленно развивающийся и опасность интенсивного фронтального развития суффозии в ближайшие десятилетия исключена. О медленном развитии процесса фильтрации свидетельствуют стабильность формы фильтрационного потока в основании сооружения и относительное постоянство расходов вертикального дренажа.

Однако отсутствие интенсивного, фронтально развивающегося процесса суффозии не исключает возможности образования некоторых локальных размывов, представляющих опасность для сооружения. Поэтому необходимо принять профилактические меры.

Остановимся на мероприятиях по защите основания сооружения от химической суффозии. Из сопоставления данных натурных наблюдений с проектными данными следует, что эффективность цементационной завесы ниже, чем это предусматривалось проектом. Тем не менее, проведение работ по дополнительной цементации на всем фронте завесы в ближайшее время нецелесообразно, поскольку при возведении завесы уже была достигнута плотность, близкая к предельно возможной в условиях пород Камского гидроузла, а кроме того, по натурным данным нет достаточных оснований считать, что общее состояние завесы за годы наблюдений с 1961 по 1966 г. существенно ухудшилось. Отсюда следует, что, пока нет явных признаков уменьшения плотности завесы, основное внимание должно быть

уделено защите основания с помощью вертикального дренажа. У ВГЭС вертикальный дренаж является регулируемым и может включаться при разных значениях напора в дренажном коллекторе.

Сложность решения вопроса о вводе дренажа в эксплуатацию определяется тем, что дренаж, облегчая условия работы части основания, расположенной ниже по течению, усиливает интенсивность фильтрации в верховой части. В условиях суффозионно-неустойчивого основания последнее нежелательно.

Анализ результатов наблюдений пробных включений системы вертикального дренажа показывает, что этот дренаж весьма эффективен для понижения давления в основании фундаментной плиты. Для выявления влияния включений вертикального дренажа на фильтрационный и суффозионный режимы были рассмотрены графики пьезометрического напора всех пьезометров основания ВГЭС, и по этим данным были высчитаны обобщенные показатели, характеризующие изменения фильтрационного режима после включения дренажа. Так, была определена зависимость величины остаточного напора на верхнем конце фундаментной плиты от величины напора в дренажном коллекторе. Кроме того, была установлена зависимость уменьшения расхода под фундаментной плитой и увеличения расхода в верховой части основания от напора в коллекторе (рис. 8-19). Изучение изменений химического состава потока показало, что, насколько можно судить по результатам наблюдений за сравнительно кратковременный период испытаний вертикального дренажа, соответствующие изменения минерализации происходят в пределах сезонных колебаний.

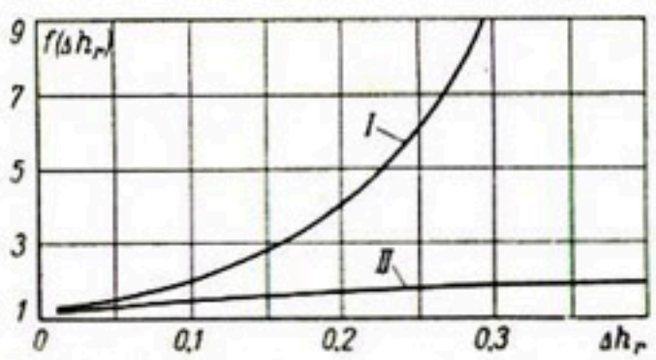


Рис. 8-19. Определение рационального режима работы дренажа.

I — график зависимости $\frac{Q_{оф}}{Q_{ф}} = f(\Delta h_r)$, где $Q_{оф}$ — расход под фундаментной плитой при выключенном дренаже; Δh_r — падение напора в дренажном коллекторе, равное $\Delta S/H_0$; ΔS — понижение напора при включении дренажа; H_0 — напор на сооружение; $Q_ф$ — фильтрационный расход при включенном дренаже; *II* — график зависимости $\frac{Q_в}{Q_{ов}} = f(\Delta h_r)$, где $Q_{ов}$ — расход в верховой части основания при выключенном дренаже; $Q_в$ — то же, при включенном.

Легко показать, что приведенные выше материалы дают возможность принципиально решить вопрос о целесообразности ввода системы вертикального дренажа в постоянную эксплуатацию. В самом деле, включение вертикального дренажа, интенсифицируя режим фильтрации в верховой части основания, может усиливать процесс суффозии. Следовательно, если зона развития суффозии лежит значительно выше створа сооруже-

ния и поток в основании уже насыщен, то включение дренажа будет нежелательным. Иначе обстоит дело, если процесс суффозии уже затронул основание сооружения. Тогда первоочередной целью является защита от суффозии наиболее важной части основания, даже при увеличении размыва других, менее ответственных участков, и, следовательно, ввод дренажных устройств в работу необходим. Из оценки состояния основания следует, что процесс суффозии уже затронул основание ВГЭС и включение дренажа в эксплуатацию целесообразно. Отсюда определяется и оптимальный режим включения, который в дальнейшем должен быть уточнен по данным длительных наблюдений за химическим составом потока. Из рис. 8-19 видно, что наибольшая эффективность защиты основания фундаментной плиты в отношении фильтрационного режима обеспечивается при напоре в дренажном коллекторе, близком к напору нижнего бьефа. Однако по техническим причинам, во избежание подпитки дренажа из нижнего бьефа в результате суточных колебаний уровня бьефа, напор в дренажном коллекторе должен превышать уровень нижнего бьефа на 2—3 *м*.

В заключение следует заметить, что при пробных включениях дренажа с напором в коллекторе, близким к уровню нижнего бьефа, были обнаружены отрицательные значения напоров у отдельных контактных пьезометров под фундаментной плитой. На этом основании было высказано предположение, что при понижении напора в дренажном коллекторе под фундаментную плиту может быть привлечена вода из нижнего бьефа. Специальное изучение показаний указанных пьезометров свидетельствует о том, что эти пьезометры контролируют участки основания с исключительно низкими значениями коэффициента фильтрации, причем иногда отрицательные напоры обнаруживаются в них и в условиях работы сооружения с отключенным дренажем. Отсюда следует, что области отрицательного напора имеют локальное значение и вызываются дренирующим влиянием сооружения.

§ 8-7. Анализ эпюр напоров по подземному контуру гидротехнических сооружений

Эпюра напоров по подземному контуру гидросооружения, построенная по показаниям пьезометров, является одним из важнейших показателей состояния сооружения. Эффективность и неисправности шпунтовых стенок, противофильтрационных завес, понуров, дренажных устройств и т. д. могут быть характеризованы на основании анализа названных эпюр напоров.

Для анализа состояния фильтрации под гидросооружениями необходимо иметь ряд эпюр напоров, полученных для характерных моментов работы сооружения: при нормальном подпертом

уровне верхнего бьефа, при весеннем паводке, при зимнем режиме, а также эпюры средних напоров за отдельные периоды года. По эпюрам напора, построенным в абсолютных величинах, ввиду изменения уровней воды в бьефах трудно судить о процессах, происходящих в основаниях гидросооружений. Поэтому следует строить эпюры приведенных напоров, построение которых описано в § 2-11.

Назовем нормальными те эпюры напоров, которые будут иметь место в случае отсутствия строительных дефектов и при правильной работе всех противофильтрационных устройств. При наличии какого-либо дефекта нормальная в указанном смысле эпюра напоров деформируется.

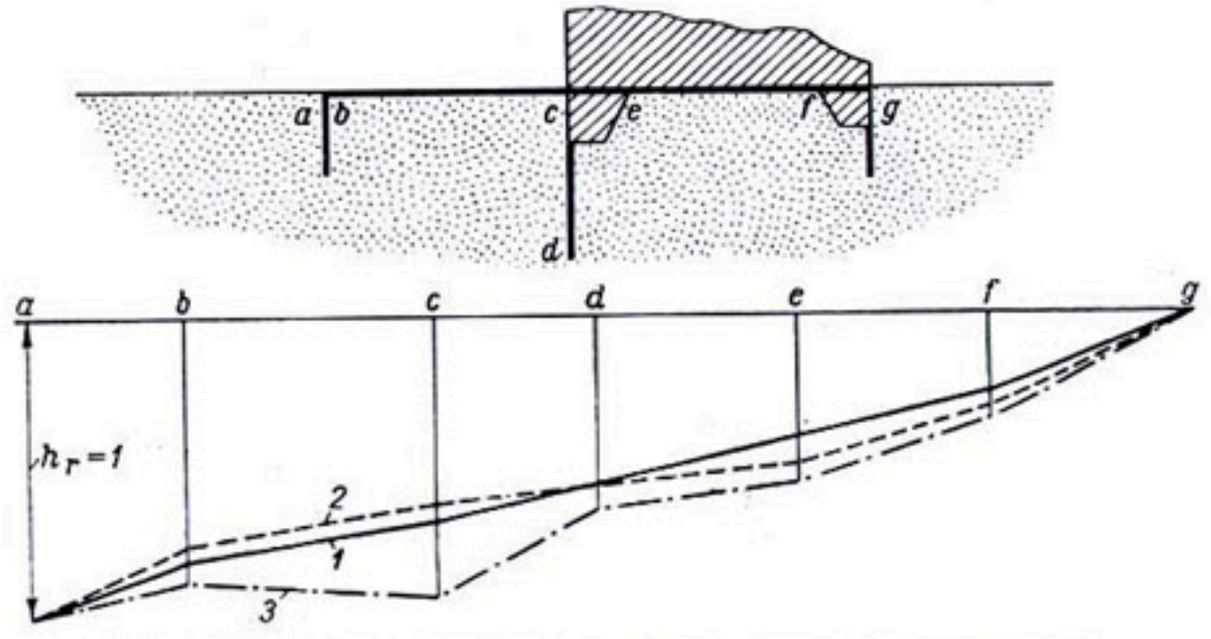


Рис. 8-20. Схема флютбета и эпюры приведенных напоров.
1 — нормальная эпюра; *2* — эпюра при наличии щелей в королевом шпунте; *3* — эпюра при наличии щели в точке *c*.

Остановимся на некоторых характерных дефектах элементов подземного контура и их влиянии на эпюру приведенных напоров. На флютбете (рис. 8-20) нормальная эпюра напоров изображена в предположении водонепроницаемости понурного и королевого шпунтов. При наличии щелей в этих шпунтах эпюра напоров изменяется. На том же рисунке показана эпюра напоров в условиях образования щелей в королевом шпунте.[1] Как видно, приведенные напоры на подземном контуре понура уменьшаются, а под фундаментной плитой плотины увеличиваются. Увеличение приведенных напоров зависит от степени щелеватости шпунтового ряда, формы подземного контура и геологического строения основания плотины. Естественно, что при уменьшении щелеватости королевого штунта, например вследствие кольматации, наблюдается обратная картина.

[1] Подробнее о щелеватости шпунтов сказано в § 8-9.

При увеличении щелеватости понурного шпунта напоры на линии подземного контура увеличиваются. Весьма существенное влияние на эпюру напоров оказывает возникновение щели в точке сопряжения понура с фундаментной плитой водослива. Как видно на рис. 8-20 и 8-21, напоры на фундаментную плиту значительно возрастают, и эпюра приобретает форму, изображенную на рисунках. Особенно резкое возрастание напоров будет близ места сопряжения понура с фундаментной плитой. В § 8-5 было сказано о существенном влиянии температуры на напоры по контуру флютбетов исследованных плотин, объясняющемся различной степенью раскрытия щелей в зависимости от температуры воздуха и воды.

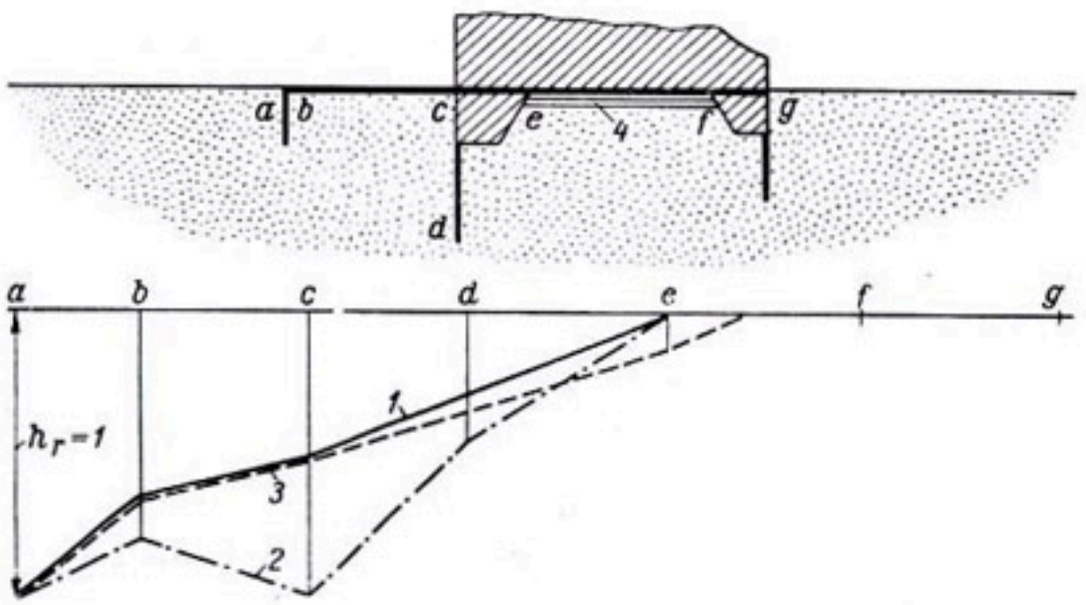


Рис. 8-21. Схема флютбета с дренажем и эпюры приведенных напоров.

1 — нормальная эпюра; *2* — эпюра при наличии щели в точке *c*; *3* — эпюра при фильтре частично заиленном; *4* — обратный фильтр.

Если обратный фильтр под дренированной фундаментной плитой плотины засоряется, то напоры на подошву сооружения возрастают. Это возрастание распространяется практически обычно до королевого шпунта, как показано на рис. 8-21, где полное засорение фильтра произошло на длине, равной $^1/_3$ длины дренированной части контура. На эпюру напоров по контуру понура и понурного шпунта неисправность дренажа влияние почти не оказывает.

Выходной шпунт между фундаментной плитой и водобоем часто делается перфорированным из соображения уменьшения напоров перед шпунтом. Если вследствие кольматации проницаемость выходного шпунта уменьшается, то напоры с верховой стороны шпунта на некотором расстоянии от него увеличиваются и противодавление на плотину возрастает.

Влияние на эпюру цементационной завесы аналогично влиянию шпунтовой стенки. При обтекании завесы теряется значительная часть напора, и если напоры по подземному контуру ниже завесы со временем увеличиваются, то это свидетельствует о выщелачивании завесы. В связи с этим расходы воды, поступающей в дренажные скважины, заложенные ниже завесы, возрастают.

К числу факторов, неблагоприятно действующих на гидросооружения, относится химическая суффозия пород оснований сооружений. Химическая суффозия, сведения о которой приведены в главе 7, проявляется обычно в увеличении фильтрационного расхода под гидросооружениями. Но она влияет и на форму эпюры напоров по подземному контуру. В зонах, где химическая суффозия происходит особенно интенсивно, коэффициент фильтрации породы увеличивается. Линии равных приведенных напоров сдвигаются в направлении течения грунтовых вод, и давление в точках, расположенных на подземном контуре, возрастает.

Анализ развития химической суффозии достаточно сложен, эпюра напоров в этом анализе не играет первостепенной роли, за исключением случаев, когда развитие суффозии происходит в непосредственной близости от элементов подземного контура сооружения. Ввиду сложности и специфичности исследований развития химической суффозии в натурных условиях в § 8-6 и был приведен пример исследования гидросооружения на основании, подверженном действию химической суффозии.

К благоприятно действующим на гидросооружения факторам относится кольматация дна и бортов водохранилища наносами, отлагающимися естественным путем. При известных условиях кольматация может создать перед плотиной естественный слабопроницаемый понур. Выразить количественно эффект естественной кольматации в настоящее время трудно из-за отсутствия достаточного количества наблюдений. Однако имеется значительное число примеров, когда естественная кольматация существенно уменьшает фильтрационный расход и величину противодавления.[1]

При наличии естественной кольматации водохранилища перед плотиной ординаты эпюры приведенных напоров уменьшаются. Это уменьшение грубо приближенно пропорционально расстоянию от низового конца флютбета до данной точки развернутого подземного контура. Оно особенно значительно в верхней части подземного контура, т. е. под искусственным понуром, если он имеется, и перед противофильтрационной

---

[1] Носова О. Н., Задворный Г. М. Опыт натурных исследований фильтрационных процессов на эксплуатируемых гидроузлах. «Гидротехническое строительство», 1967, № 8.

завесой в плотинах, стоящих на скальном трещиноватом основании. В этих случаях большую пользу приносят пьезометры под понуром гидросооружения, как наиболее ясно выражающие эффект кольматации водохранилища.

В § 8-5 было сказано о влиянии на фильтрацию под бетонными гидросооружениями их дренирующего действия, которое проявляется при условии, если коэффициент фильтрации бетона значительно больше коэффициента фильтрации грунта основания. Теоретически полученные при проектировании эпюры напоров и противодавления в таких случаях имеют мало общего с полученными путем натурных исследований.

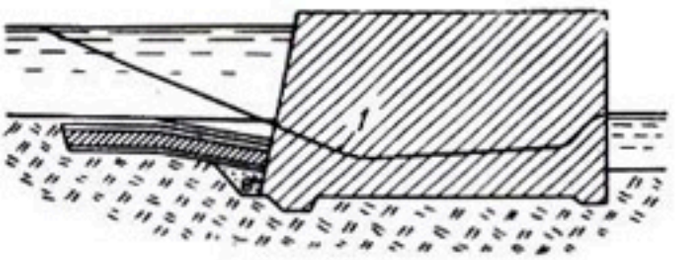


Рис. 8-22. Схема эпюры напоров под зданием ГЭС в условиях дренирования грунтовых вод бетоном.

1 — эпюра напоров.

В 1943 г. О. В. Вяземский, исследуя фильтрацию в сооружениях одного из волжских гидроузлов, отметил, что по подошве основания гидростанции имеется резкое падение напора по направлению к насосной потерне. При этом грунтовые воды двигались как со стороны верхнего, так и со стороны нижнего бьефов [39]. Принципиальная схема эпюры напоров представлена на рис. 8-22. Аналогичное явление наблюдалось в водосливной плотине Каунасской ГЭС. В основании этой плотины залегает суглинок, коэффициент фильтрации которого на 1—2 порядка меньше коэффициента фильтрации бетона.

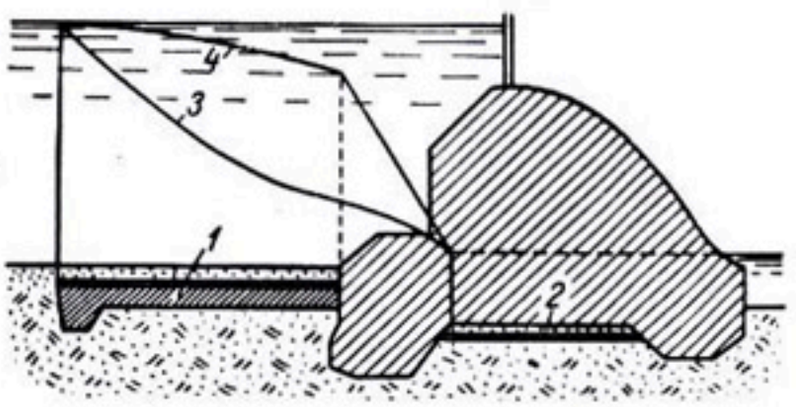


Рис. 8-23. Схемы эпюр напоров в плотине из непроницаемого и относительно сильнопроницаемого бетона.

1 — непроницаемый понур; *2* — обратный фильтр; *3* — эпюра напоров при непроницаемом теле плотины; *4* — действительная эпюра напоров.

На рис. 8-23 показаны качественно эпюра напоров в предположении водонепроницаемого бетона и действительная эпюра, полученная из натурных наблюдений. Как видно из рисунка, эти эпюры совершенно различны. В действительности происходит незначительное падение напора в пределах понура, так что понур в отношении снижения противодавления играет малую роль.

Падение напора начинается с той точки, которая соответствует входу потока в бетонный массив плотины. Опыты по

методу ЭГДА вполне подтвердили форму реальной эпюры [16]. Следует, впрочем, отметить, что по мере старения бетона картина распределения напоров изменялась. Если в начале существования плотины падение напора на протяжении понура составляло 3—4 *м*, то примерно через два года оно было равным около 6,5 *м*.

§ 8-8. Исследование эффективности противофильтрационных завес

Исследования эффективности противофильтрационных завес зачастую требуют длительных и разнообразных наблюдений. Эти исследования осложняются геологическим строением толщи основания, трещиноватостью скальных пород, обусловливающей сложную форму грунтового потока.

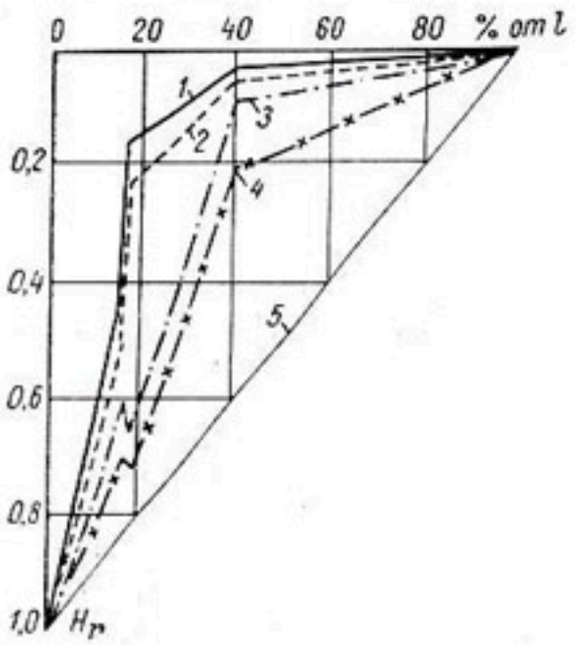


Рис. 8-24. Эпюра приведенного противодавления.

1, 2, 3 и *4* — эпюры для различных моментов времени; *5* — треугольная эпюра.

Основное назначение противофильтрационных завес:

1) уменьшить величину противодавления на подошву гидросооружений;

2) уменьшить скорости фильтрации в основаниях для предохранения последних от механической и химической суффозии.

В некоторых случаях противофильтрационные завесы имеют также назначение уменьшать потери на фильтрацию из водохранилищ. Указанные назначения завес должны приниматься во внимание при их натурных исследованиях.

При исследовании эффективности противофильтрационной завесы необходимо проводить анализ эпюр противодавления на подошву гидросооружения, полученных по показаниям пьезометров сети (рис. 8-24). Эпюры приведенного противодавления сравниваются с проектными, в результате чего устанавливается реальный коэффициент устойчивости сооружения. Сравнение эпюр приведенного противодавления за длительный промежуток времени дает возможность судить о прочности противофильтрационной завесы. Систематическое уменьшение приведенного напора перед завесой свидетельствует о нарушении водонепроницаемости завесы. Если под подошвой сооружения ниже завесы дренаж отсутствует, то в результате нарушения завесы увеличится противодавление, которое может достигнуть значений, не допустимых с точки зрения обеспечения устойчивости.

Если же ниже завесы имеется дренаж, то при нарушении завесы увеличиваются скорости фильтрации в основании сооружения, а также увеличивается фильтрационный расход.

Мы не будем касаться физико-химических причин нарушения плотности противофильтрационных завес различных типов. Долговечность завес зависит от целого ряда условий. В частности, на стойкость наиболее распространенных цементационных завес влияет вид цемента и агрессивность грунтовых вод [3].

Типичная эпюра приведенного противодавления при наличии завесы и вертикального дренажа показана на рис. 8-25. Однако форма подобной эпюры может значительно искажаться в зависимости от ряда причин.

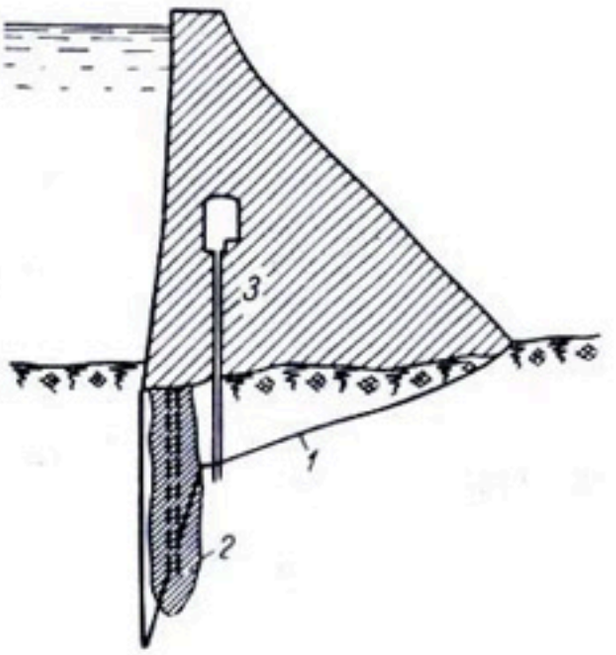


Рис. 8-25. Эпюра приведенного противодавления плотины.

1 — эпюра противодавления; *2* — завеса; *3* — дренаж.

Выше было указано влияние суффозии завесы на эпюру противодавления. Засорение дренажных устройств также деформирует низовую часть эпюры противодавления, повышая давления на флютбет. Вследствие трещиноватости пород основания гидросооружений эпюра противодавления иногда приобретает пилообразную форму, как, например, на плотине Гувер в США [42].

Наличие тектонических трещин и неоднородность геологического строения оснований влияют на изменение формы эпюры противодавления. Если построить «продольную» эпюру давления, т. е. эпюру давлений на флютбет в вертикальной плоскости, параллельной оси плотины, то зачастую получается кривая, имеющая ряд пиков, обусловленных указанными обстоятельствами.

Такое явление наблюдалось, например, в плотине Днепрогэс имени В. И. Ленина [42], где эпюра давления вдоль оси плотины характеризовалась значительной неравномерностью и сложностью. Сравнение эпюр противодавления, полученных для различных пролетов плотины, обычно свидетельствует о различных формах эпюр и численных характеристиках противодавления. Так, в плотине Днепрогэс, построенной на скальных кристаллических породах, в пролетах 16—17 наблюдалось значительное увеличение противодавления по сравнению с расчетным, а также с противодавлением в других пролетах. В некоторых пролетах коэффициент устойчивости плотины на сдвиг

оказался намного ниже допускаемого. Произведенная цементация дала снижение противодавления в большинстве пролетов. Однако в пролетах 16—17 это снижение оказалось временным. Исследование показало, что пролеты плотины находятся в зоне тектонической трещины. В пролете 17 на глубине 1,5 *м* ниже подошвы плотины была обнаружена прослойка пористых хлоритовых сланцев.

Исследования цементационной завесы на плотине Днепрогэс проводились в течение нескольких лет, однако и в настоящее время имеются некоторые расхождения в оценке работы цементационной завесы, что свидетельствует о сложности подобных исследований [42, 135].

Неблагоприятная с точки зрения устойчивости гидросооружения форма эпюры противодавления обусловливается нарушением водонепроницаемости завесы, а также засорением дренажа. Чаще же всего эта форма является результатом неучета при проектировании геологических факторов. К числу таких факторов относятся, например, тектонические трещины, карсты, зоны милонитизации, химическая суффозия пород основания сооружения, наличие в низовой части основания подпорного сооружения водонепроницаемых зон и т. д. Неучет подобных обстоятельств при проектировании может привести к нерациональным решениям вопросов о размерах и качестве завесы, что, в свою очередь, влечет за собой неблагоприятную форму эпюр противодавления.

Поэтому натурные исследования противофильтрационных завес обычно неразрывно связаны с детальным изучением геологических и гидрогеологических условий, недостаточно освещенных при изысканиях.

В практике натурных исследований можно найти ряд примеров, когда уточнение геологического строения основания в значительной степени помогало при анализе работы противофильтрационных завес. Таким примером, в частности, является объяснение причин увеличения противодавления в некоторых пролетах плотины Днепрогэс; о нем сказано выше.

При натурных исследованиях цементационной завесы Усть-Каменогорской плотины изучались гидрогеологические характеристики зоны милонитизации, в пределах которой противодавление на подошву было значительно выше, чем в других створах.

Некоторым критерием оценки эпюры противодавления является отношение площадей эпюр приведенных противодавлений — эпюры, полученной из наблюдений $\Omega_д$, и треугольной, отвечающей линейному закону изменения давления Ω_0 [42]. Это отношение можно обозначить $\alpha_п$:

$$\alpha_п = \frac{\Omega_д}{\Omega_0}. \qquad (8\text{-}17)$$

При нарушении водонепроницаемости завесы коэффициент $\alpha_п$ увеличивается во времени.

На рис. 8-24 показаны эпюры приведенного противодавления в одном и том же поперечном створе плотины, а также треугольная эпюра площадью Ω_0. По горизонтальной оси отложены расстояния в процентах от ширины флютбета l, а по вертикальной оси — приведенные действующие напоры H_r. Как видно из рисунка, коэффициент α_n с течением времени увеличивается.

Другим критерием для оценки эффективности завесы является отношение напора за створом дренажа к действующему напору на сооружении.

На рис. 8-26 показана одна из расчетных схем противодавления на плотину при наличии противофильтрационной завесы и вертикального дренажа, створ которого расположен на расстоянии a от верховой грани плотины. Напор за створом дренажа, как видно на рисунке, равен $\alpha_1 H$, где H — действующий напор на плотине. Коэффициент α_1 — существенный критерий оценки работы завесы, и при натурных исследованиях им можно пользоваться как при сравнении эпюр противодавления в различных поперечных створах, так и при оценке работы завесы в одном и том же створе во времени.

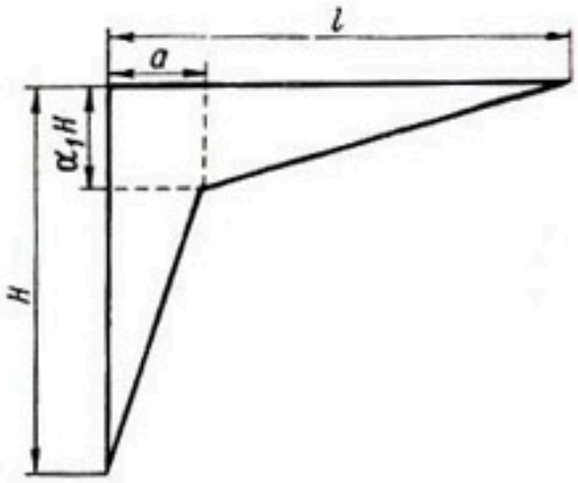


Рис. 8-26. Расчетная эпюра противодавления.

Следует подчеркнуть, что сравнение эпюр противодавления, а также приведенных величин потерь напора в зоне завесы, как и вообще получение всяких закономерностей, следует проводить в сопоставимых условиях, в частности в условиях установившейся фильтрации. Известно, что ввиду упругости пористой среды и воды колебания уровней бьефов вызывают соответствующие изменения скоростей фильтрации и давлений не мгновенно, а со сдвигом, исчисляющимся иногда месяцами.

Изменение приведенных напоров в основании гидротехнического сооружения, имеющего противофильтрационную завесу, является косвенным показателем ее плотности.

Водопроницаемость завесы характеризуется величиной удельного водопоглощения в зоне расположения завесы. Под величиной удельного водопоглощения понимается расход воды, отнесенный к единице длины опробуемого участка буровой скважины и к единице давления, создаваемого при нагнетании.

Удельное водопоглощение вычисляется по формуле:

$$w = \frac{Q}{Hl}\left[\frac{л}{мин \cdot м^2}\right]. \qquad (8\text{-}18)$$

где Q — расход, *л/мин*; l — длина опробуемого участка сква-

жины, *м*; H — напор, *м*, вычисляемый как сумма манометрического напора и высоты столба воды от устья скважины до первоначального пьезометрического уровня грунтовых вод в исследуемой зоне, а если грунт неводонасыщенный, то до нижнего конца опробуемого участка.

Обычно при определении удельного водопоглощения создаются напоры 20—50 *м*, однако при наличии сильно трещиноватых пород нагнетание допускается с напорами, значительно меньшими.

При линейной зависимости между расходом Q и напором H величина удельного водопоглощения остается постоянной для всех создаваемых напоров. Однако в практике исследований зачастую наблюдаются отклонения от указанной линейной зависимости. Это объясняется разнородностью пород, в которых происходит фильтрация при нагнетании, если порода неводонасыщена, явлениями механической суффозии, а также возможным отклонением фильтрации от закона Дарси в непосредственной близости от скважины.

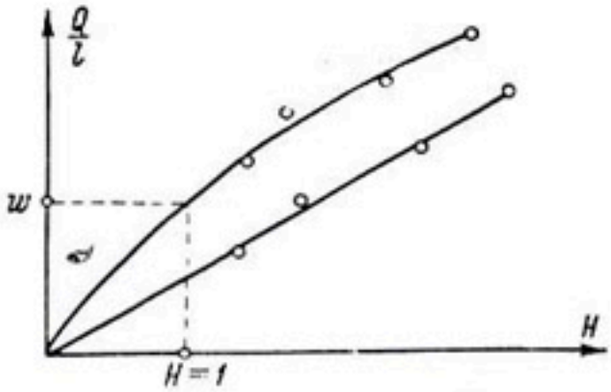


Рис. 8-27. Опытные кривые $\frac{Q}{l}=f(H)$.

В подобных случаях строится эмпирическая кривая $Q/l=f(H)$. Очевидно, что при $H=0$ удельный расход $Q/l=0$. Имея несколько опытных точек, строим кривую $Q/l=f(H)$, как показано на рис. 8-27. По этой кривой находится величина удельного водопоглощения w, равная Q/l при $H=1$.

Величина удельного водопоглощения связана с коэффициентом фильтрации, и последний можно вычислить по формулам откачек (см. главу 5) в случае линейной связи между Q и H и расположения опробуемого интервала ниже зеркала грунтовых вод. Однако связь эта не является достаточно определенной, если грунт неводонасыщенный. По величине удельного водопоглощения при нагнетании в неводонасыщенный грунт определить коэффициент фильтрации возможно лишь в порядке приближенной прикидки[1]. При этом можно воспользоваться основанной на графике Бюро мелиорации США формулой [104]:

$$k\ [м/сут] \approx w\ [л/мин \cdot м^2]. \qquad (8\text{-}19)$$

Определение удельного водопоглощения в единичных скважинах не может дать полного представления о водопроницаемости

[1] Иногда погрешность при таком определении коэффициента фильтрации достигает 100—200% [61, 135].

завесы. Ввиду неоднородности пород и разнообразного характера заполнения трещин важно иметь статистические данные о водопоглощении в зоне завесы.

С этой целью результаты ряда опробований скважин представляются в виде статистических кривых удельного водопоглощения. При построении этих кривых по горизонтальной оси откладываются величины удельных водопоглощений (обычно в логарифмическом масштабе), полученные из отдельных опробований скважин, а по вертикальной оси — соответствующие этим водопоглощениям количества опробованных зон в процентах от общего их числа, в которых водопоглощение было меньше данного. Статистическая кривая удельного водопоглощения по способу ее построения аналогична кривой гранулометрического анализа грунта.

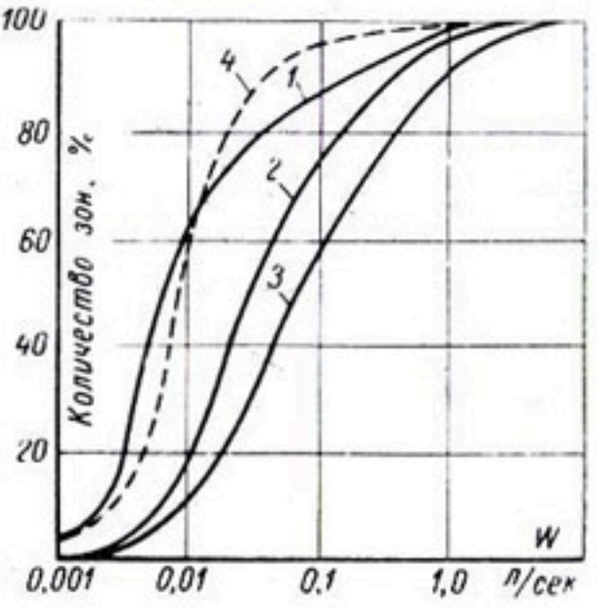


Рис. 8-28. Статистические кривые удельного водопоглощения.

1, 2, 3 — кривые, полученные последовательно во времени; *4* — кривая после дополнительной цементации.

Статистические кривые удельного водопоглощения применяются при контроле работы выполненных противофильтрационных завес [135]. На рис. 8-28 сплошными линиями изображены три статистические кривые удельного водопоглощения для участка цементационной завесы. С течением времени ввиду выщелачивания первоначальная кривая *1* заменилась кривой *2* и, наконец, кривой *3*. После дополнительной цементации была получена кривая *4*. Таким образом, статистические кривые удельного водопоглощения дают достаточно наглядную картину изменения во времени водопроницаемости завесы и эффекта дополнительной цементации.

Изложенное выше относилось главным образом к русловым напорным завесам, устраиваемым в основаниях гидросооружений. Однако часто подвергаются исследованиям завесы береговые, безнапорные, устраиваемые в береговых примыканиях гидросооружений. Береговой грунтовой поток обтекает подобные завесы, причем падения напора на завесе обычно невелики. Они могут быть определены при помощи пьезометрической сети. Для полного представления об эффективности береговой завесы строятся карты гидроизогипс и, если имеются сильно водопроницаемые напорные горизонты, также карты гидроизопьез.

Основным критерием надежности противофильтрационных завес является условие наличия градиента напора, меньшего допустимого в зоне завесы. Величина допустимого градиента напора зависит от ряда факторов, как-то: плотность завесы,

род инъектируемого материала, наличие агрессивных подземных вод и т. д. Заметим, что в зависимости от коэффициента фильтрации допустимый градиент напора в завесе в трещиноватых скальных породах рекомендуется в пределах 10—20, а в песчаных и песчано-гравийных грунтах в пределах 2—3. Максимальный градиент напора в завесе будет в месте ее примыкания к основанию или устою гидросооружения.

В настоящее время распространено ярусное строение русловых завес, при котором завеса состоит из нескольких рядов скважин в верхней ее части, а в нижележащих частях количество рядов уменьшается, доходя в нижней части до одного ряда. Такое строение обусловлено в основном тем, что в верхних частях завесы падение напора, а следовательно, и градиент напора в одноярусной завесе будет максимальным. При натурных исследованиях завес полезно строить эпюры градиентов напора по глубине завесы. Эти эпюры существенно помогают при оценке надежности завесы.

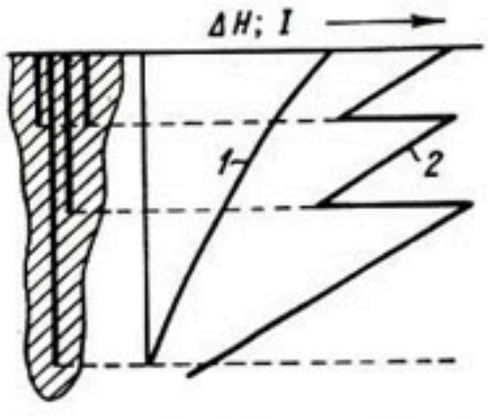


Рис. 8-29. Эпюры падения напора и градиентов напора по длине трехъярусной завесы.

1 — эпюра падения напора; *2* — эпюра градиентов напора.

На рис. 8-29 изображена схема трехъярусной завесы, эпюра падения напора ΔH и градиентов напора I по глубине завесы. Градиенты напора, очевидно, находятся по формуле:

$$I = \frac{\Delta H}{a}, \qquad (8\text{-}20)$$

где a — толщина завесы в данном сечении.

Основное затруднение при натурных исследованиях противофильтрационных завес в случае их неудовлетворительной работы заключается в выяснении роли завесы в общей картине фильтрации. Показания пьезометров далеко не всегда позволяют судить о качестве завесы. Поэтому в сложных случаях приходится проводить комплексные исследования фильтрации. При этом, помимо обработки материалов систематических наблюдений за пьезометрическими напорами, зачастую необходимо ставить специальные исследования: определение удельного водопоглощения, определение скоростей фильтрации при помощи индикаторов, взятие кернов для исследования заполнения трещин и пустот породы, исследование поля скоростей фильтрации в натурных условиях, исследование температурного поля, исследование химизма грунтовых вод с целью выяснения размеров химической суффозии, уточнение деталей геологического строения толщи основания и т. д.

Поэтому иногда трудно даже составить программу исследований противофильтрационной завесы.

При исследовании фильтрации в основаниях сооружений Усть-Каменогорского гидроузла [60] большое внимание было уделено факту относительно большого противодавления на подошву в одном из пролетов водосливной плотины. В отношении устойчивости сооружения повышенное противодавление не представляло опасности, однако, если в других пролетах на цементационной завесе гасилось около 85% напора, в данном пролете погашенная часть напора составляла 55—60% от действующего напора. Между тем для понижения противодавления в данном пролете была усилена цементационная завеса, углублена дрена, устроены дренажная штольня, дрены, выходящие из штольни, и т. д.

Был проведен ряд различных исследований фильтрации, с этой целью была расширена пьезометрическая сеть. Проведены исследования направлений фильтрации при помощи индикаторов, запускаемых в пьезометры, произведены опытные наливы и откачки в скважинах, дренах и пьезометрах химические и термические анализы грунтовых вод, исследования механической суффозии и т. д.

При анализе были использованы материалы наблюдений за уровнями в пьезометрах в течение 9-летнего периода, данные по расходу цемента и по водопоглощению, полученные при дополнительной цементации.

Значительную роль в выяснении причин повышенного противодавления в пролете плотины сыграли исследования направлений фильтрации.

В результате этих исследований было установлено, что основным грунтовым потоком в пролете с повышенным противодавлением является береговой поток. Его действие сочетается со специфической ролью большой зоны милонитизации, представляющей собой сильно рассланцованное габбро, частично превращенное в щебень и тектоническую глину.

Описанный случай свидетельствует о необходимости составления рабочей программы исследований противофильтрационной завесы с учетом исследований других элементов сооружения, которые защищают его от вредного действия фильтрации.

§ 8-9. Натурные исследования шпунтовых стенок

Шпунтовые стенки как противофильтрационное мероприятие играют важную роль в гидротехнических сооружениях. Входя составным элементом конструкции флютбетов, земляных плотин, строительных перемычек, оснований гидростанций и др., шпунтовые стенки предназначены в одних случаях снижать фильтрационный расход, в других — снижать противодавление на флютбеты, уменьшать градиенты напора и т. д.

Еще сравнительно недавно считалось, что шпунтовые стенки можно при расчетах рассматривать как водонепроницаемые.

Однако натурные исследования показали, что такое допущение часто не оправдывается, вследствие чего вопрос о водопроницаемости шпунтовых стенок был подвергнут изучению [33, 185].

Лабораторные исследования в фильтрационных лотках, а также по методу ЭГДА показали, что шпунтовые стенки, как правило, являются водопроницаемыми. Эти исследования имели в основном теоретическое значение. Что касается натурных исследований, то здесь мы встречаемся с некоторой неопределенностью, происходящей от причин, которые в настоящее время трудно учесть при фильтрационном расчете. Имеются примеры весьма эффективной работы шпунтовых стенок [36]. Если за ха-

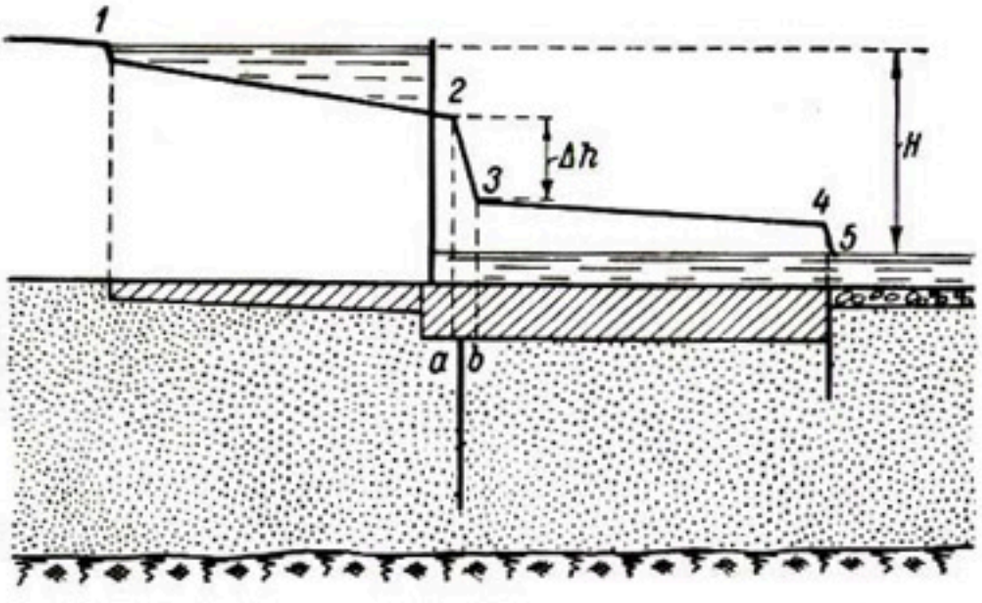


Рис. 8-30. Флютбет с исследуемой шпунтовой стенкой.
1, 2, 3, 4, 5 — эпюра напоров по контуру флютбета.

рактеристику работы шпунта, доходящего до водоупора, принять так называемую виртуальную толщину шпунта, т. е. если заменить шпунтовую стенку равным по фильтрационному сопротивлению прямоугольным массивом грунта с тем же коэффициентом фильтрации, что и у однородного грунта, в который забит шпунт [185], то названная виртуальная толщина φ по данным натурных исследований будет варьировать для металлических шпунтов в пределах от 50 до 4000 *м*, а для деревянных от 5 до 160 *м* [184].

Заметим, что проведенные натурные исследования данного вопроса не являются систематическими и обнимают узкий круг случаев. Натурные исследования работы шпунтовых стенок практически важны, и при размещении пьезометров по контуру гидросооружений обычно предусматривается возможность измерения пьезометрических напоров выше и ниже шпунтовой стенки.

Согласно способу суммарного учета местных сопротивлений, разработанному С. Н. Нумеровым [115], в зоне резко изменяю-

щейся фильтрации в окрестности шпунтовой стенки потеря напора

$$\Delta h = \Phi \frac{q}{k}, \qquad (8\text{-}21)$$

где q — фильтрационный расход, приходящийся на единицу длины стенки; Φ — фильтрационное сопротивление в названной зоне.

В окрестности шпунта между точками a и b происходит резкое падение напора Δh, показанное на рис. 8-30. График для определения фильтрационного сопротивления Φ, полученный теоретически [115] для водонепроницаемого шпунта, представлен на рис. 8-31. График дан для схемы плоского флютбета со шпунтом, отстоящим на некотором расстоянии от края флютбета.

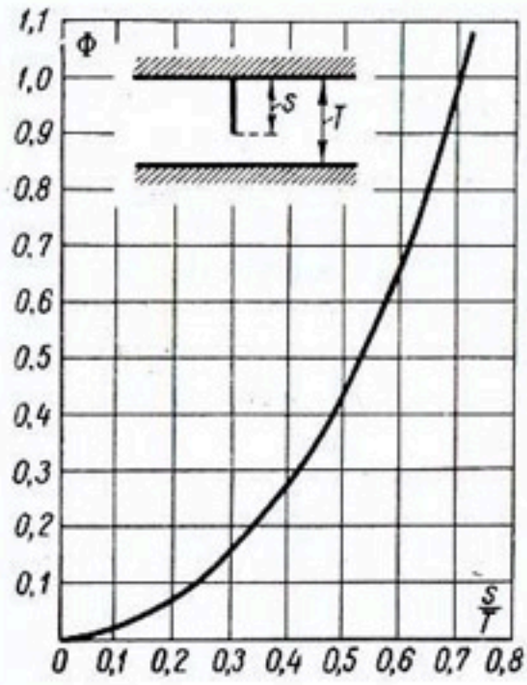


Рис. 8-31. График фильтрационного сопротивления водонепроницаемого шпунта.

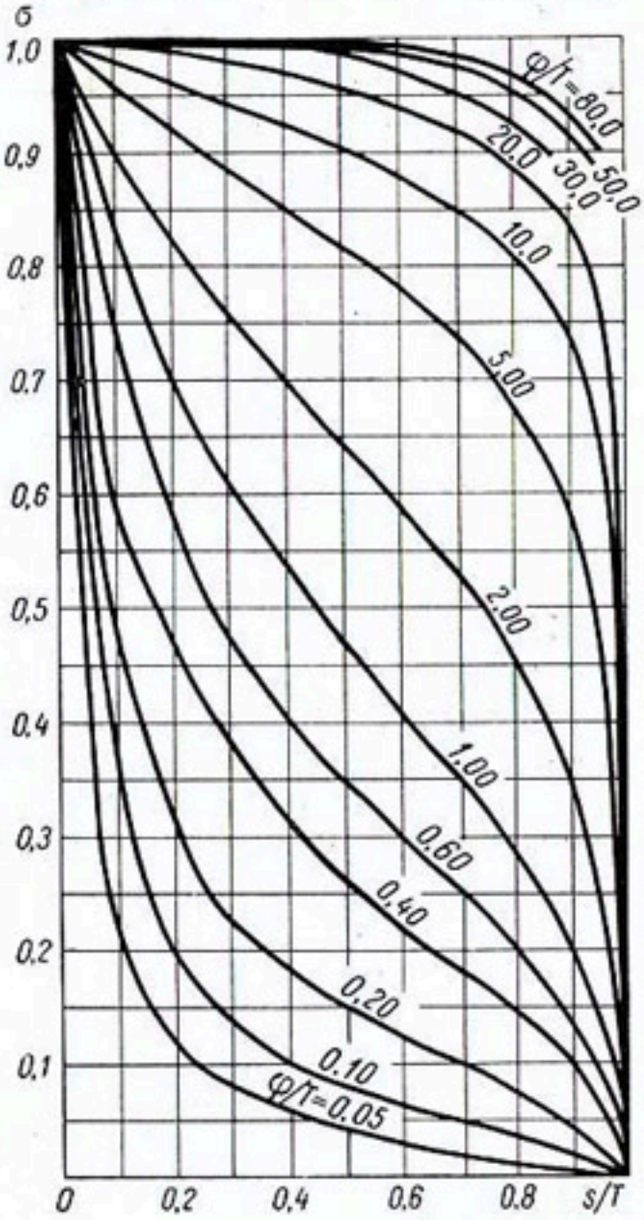


Рис. 8-32. График для расчета шпунтовых рядов.

Если шпунтовая стенка является в какой-то степени водопроницаемой, то фильтрационное сопротивление Φ' будет меньше Φ. Случай водопроницаемого шпунта рассмотрен С. Н. Нумеровым теоретически [116], причем был получен график для определения отношения:

$$\sigma = \frac{\Phi'}{\Phi}. \qquad (8\text{-}22)$$

Величина σ — критерий качества шпунтовой стенки, определяется в зависимости от отношений глубины шпунта s к мощности T водопроницаемого пласта. График представлен на рис. 8-32.

Пусть из данных натурных наблюдений известны: расход q, коэффициент фильтрации k и потеря напора по длине шпунта как разность показаний пьезометров в точках a и b (рис. 8-30). На основании формул (8-21) определяется фильтрационное сопротивление шпунта

$$\Phi' = \frac{k}{q} \Delta h. \qquad (8\text{-}23)$$

Если грунт основания однороден, а расположение шпунтовой стенки отвечает схеме рис. 8-31, то фильтрационное сопротивление шпунта Ф при отсутствии щелей можно взять по графику, а затем определить величину σ, характеризующую проницаемость шпунтовой стенки.

Если схема расположения шпунтовой стенки будет иной и при этом грунт основания будет слоистым, то величину Ф можно определить достаточно просто по методу ЭГДА.

По рекомендации Р. Р. Чугаева, если найденное значение $\sigma \geqslant 0{,}95$, то можно считать данную шпунтовую стенку практически водонепроницаемой. Если же $\sigma \leqslant 0{,}05$, то шпунтовая стенка является практически абсолютно водопроницаемой [185].

Для схемы, изображенной на рис. 8-30, можно из графика (рис. 8-32), по известным величинам s, T и σ определить соответствующее им значение φ/T и, следовательно, виртуальную толщину шпунта φ, характеризующую его эффективность.

Щели, имеющиеся в шпунтовой стенке, находятся в различных условиях. По глубине шпунта градиенты напора значительно изменяются, изменяются также значения коэффициента фильтрации. Вследствие этого кольматация щели будет неодинаковой по глубине шпунта. Поэтому полученные натурные данные характеризуют некоторую среднюю водопроницаемость шпунтовой стенки.

§ 8-10. Исследование фильтрации к дренажам

Дренажные устройства могут иметь различную конструкцию. Основными типами дренажей являются дренажи горизонтальные и вертикальные. Горизонтальные дренажи, в свою очередь, могут быть подразделены на дренажи линейные, представляющие собой горизонтальные или слабо наклонные дрены в виде труб или каналов, дренажи плоские, устраиваемые часто под подошвами гидротехнических сооружений и представляющие собой горизонтальные широкие слои из дренирующего материала.

Горизонтальные линейные дренажи могут быть одиночными или образовывать системы различной формы в плане. В част-

ности, за последнее время находит применение лучевой дренаж, представляющий собой систему горизонтальных дренажных труб, сходящихся в одной точке. Вертикальные дренажи представляют собой дренажные скважины — одиночные или образующие группы различного расположения в плане.

Дренажи устраиваются для осушения территорий и подземных сооружений, для понижения давления на стены и подошвы гидросооружений, на обделки подземных сооружений (туннелей, шахт и т. д.) и для снижения кривых свободной поверхности в плотинах и дамбах.

Остановимся на случае дренирования грунтовых вод с целью осушения. Исследования разгрузочных скважин, устраиваемых для снятия избыточного напора в пластах на территориях гидроузлов, производятся в комплексе с другими фильтрационными исследованиями. Поэтому исследования разгрузочных скважин рассмотрены в § 8-5. Осушительные дренажные системы, подвергающиеся исследованиям, располагаются на естественных болотных массивах или в районах подпора грунтовых вод от гидроузлов. В ряде случаев исследования могут быть организованы в районах расположения дренажа жилых и промышленных строений, именно в тех районах, где естественные грунтовые воды имеют высокие отметки уровней и подтапливают подвальные помещения.

Во всех этих случаях задачей изучения режима грунтовых вод является прогноз его изменения во времени.

Режим грунтового потока в районах осушения зависит, в первую очередь, от колебания уровней в реках и озерах, находящихся в этих районах. Паводковые воды влияют на уровни грунтовых вод территорий, расположенных в зонах влияния уровней рек и озер. Эти зоны влияния определяются путем сопоставления графиков изменения уровней воды в наблюдательных скважинах с графиками изменения уровней воды в реках и озерах. Если изменение уровней воды в реках и озерах происходит от естественных причин (паводки, ливни), то графики изменения уровней грунтовых вод в зонах влияния носят периодический характер. Такой же характер имеют графики изменения уровней грунтовых вод в результате искусственных водохозяйственных мероприятий, например поливов сельскохозяйственных культур, сезонного или суточного регулирования стока при помощи водохранилищ.

Указанные периодические колебания уровней грунтовых вод накладываются на систематические изменения уровней. Систематические изменения уровней происходят в результате осуществления различных водохозяйственных мероприятий: первичного наполнения водохранилища, устройства оросительной сети и т. д. Подобные мероприятия влекут за собой монотонное систематическое повышение среднегодовых уровней грунтовых вод в районах осушения, длящееся иногда много лет.

На рис. 8-33 приведены графики изменения уровней грунтовых вод на различных расстояниях от канала в Голодной степи [82]: при достаточном удалении от канала, начавшего действовать с апреля 1925 г., наблюдается систематическое монотонное повышение уровней грунтовых вод в течение нескольких лет. Подпор грунтовых вод от водохранилищ иногда распространяется десятки лет.

Изменение режима от искусственных сооружений: плотин, оросительной и осушительной систем, систем грунтового водоснабжения и т. д. с течением времени затухает, и превалирующими факторами тогда являются периодические изменения уровней в реках, каналах, водохранилищах, а также инфильтрация с поверхности земли, испарение и транспирация. Все указанные режимообразующие факторы должны учитываться при изучении режима грунтовых вод в районах осушения. Вследствие этого, наряду с систематическими замерами уровней грунтовых вод, должны проводиться наблюдения за атмосферными осадками, испарением, температурой воздуха. Дренирование районов орошения производится с целью удаления из грунта избыточных поверхностных грунтовых вод.

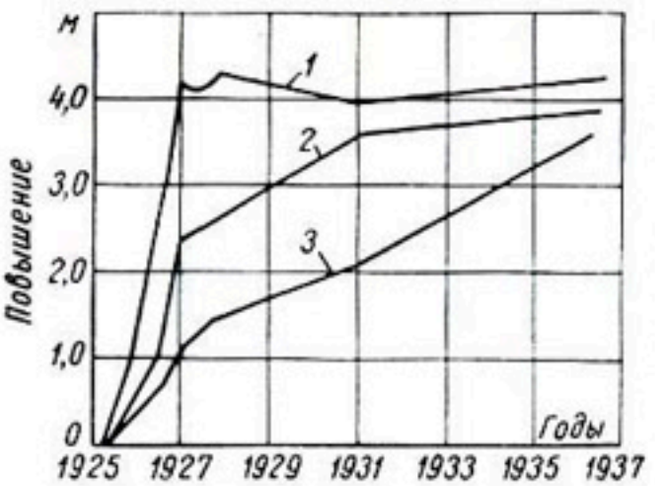


Рис. 8-33. Изменение уровней грунтовых вод в створе на оросительной системе Голодной степи на различных расстояниях от канала.
1 — 340 *м*; *2* — 2700 *м*; *3* — 4330 *м*.

Избыточные грунтовые воды, поступающие в грунт из оросительных систем, повышают уровни естественных грунтовых вод и, если данный район не обеспечен подземным стоком, могут привести к заболачиванию территории. Кроме того, если грунтовые воды, поднимающиеся вверх, засолены, то заболачивание приводит к засолению почвы и в результате образуются солончаки, непригодные для произрастания сельскохозяйственных культур. Поэтому исследование фильтрации к дренажам в районах орошения при соответствующем солевом содержании грунтовых вод включает в себя исследование солевого режима, в особенности скорости подачи солей вертикально вверх в капиллярной зоне и горизонтальной миграции солей при фильтрации к дренам.

Фильтрация на осушаемой территории обычно является плановой, т. е. поверхности равных напоров близки к цилиндрическим поверхностям. На небольшом расстоянии от дрен это свойство потока нарушается. Здесь линии тока резко искривляются в вертикальных плоскостях, и фильтрация будет близка к плоской.

При поступлении грунтовой воды в дрену возникают значительные по величине градиенты напора. Нередко у отверстий дрены, в которые проходит вода и которые защищены обратным песчаным фильтром, возникает суффозия грунта или кольматация. В первом случае частицы грунта проникают в дренажные трубы. Это явление должно быть установлено путем детальных исследований. При обнаруживании грунта, выносимого в дренажные трубы, необходимо исследовать интенсивность этого выноса и произвести гранулометрический анализ грунта, защищаемого обратными фильтрами, вынесенного грунта и грунта, образующего фильтр в зоне выноса. Грунты, подлежащие исследованию, извлекаются из специально заложенных шурфов. Необходимо определить градиенты напора близ обратного фильтра на основании замеров уровней грунтовых вод, а затем, поскольку случай интенсивного выноса грунта в дрены является аварийным, вопрос о дальнейшем развитии суффозии решается на основании экспериментальных данных, о чем сказано в главе 7.

Во втором случае в контактной зоне грунта с обратным фильтром происходит засорение пор — кольматация обратного фильтра. Пропускная способность его уменьшается, и создается подпор грунтовых вод, повышение поверхности депрессии. Натурные исследования обратных фильтров рассмотрены в § 7-6.

Фильтрационный расход, поступающий в дрены, определяется по отдельным участкам, ограниченным водовыпусками. При изучении работы дренажа представляют интерес графики сезонных колебаний расходов по участкам и по всей системе, а также графики связи между расходами и отметками уровней воды в реках и озерах, каналах, между расходами и атмосферными осадками.

При разработке программ исследования фильтрации в осушаемых районах необходимо иметь в виду те режимообразующие факторы, которые имеют значение в данном случае. При дренировании естественных грунтовых вод такими факторами являются: атмосферные осадки, испарение, колебания уровней воды в реках и водоемах, а также изменения напоров в нижележащих напорных горизонтах, которые при наличии гидравлической связи с верхним горизонтом могут быть источниками питания поверхностных грунтовых вод.

Для дренажей, расположенных в зонах орошения, влияние фильтрации из деривационных каналов и особенно в зонах подпора грунтовых вод от водохранилищ весьма существенно. В этих случаях искусственные режимообразующие факторы часто превалируют над естественными.

К таким искусственным факторам относятся попуски оросительных вод в оросительных системах и колебания уровней воды в верхнем и нижнем бьефах гидроузлов. На рис. 8-34 представлены графики изменения уровней воды в водохранилище и

фильтрационного расхода дренажа, расположенного в нижнем бьефе. Связь между расходом дренажа и отметкой уровня верхнего бьефа видна вполне отчетливо.

Заметим, что на территориях, где имеется подтопление грунтовыми водами от гидроузлов, дренированная вода может быть использована для целей водоснабжения, что и осуществляется в настоящее время на некоторых гидроузлах. Поэтому исследования химического и бактериологического состава дренажных вод в ряде случаев представляют практический интерес.

Наконец, отметим, наблюдающееся в некоторых случаях резко отрицательное влияние на пористобетонные фильтры дре-

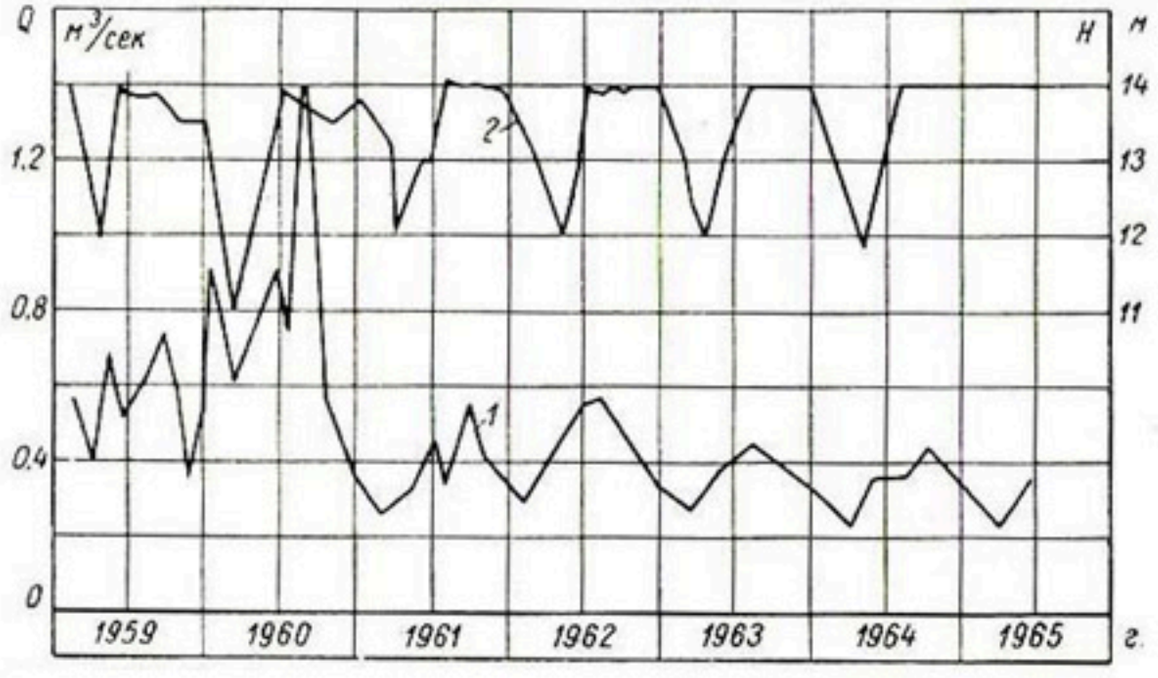


Рис. 8-34. Графики фильтрационного расхода дренажа *1* и уровня воды *2* в водохранилище.

нажей некоторых примесей к грунтовой воде промышленных стоков химических заводов.

Например, при исследованиях дренажа в г. Березники наблюдалось полное разрушение пористобетонных фильтров серной кислотой, содержащейся в грунтовой воде. Там же было отмечено зарастание пор фильтров известью. После 7-месячной эксплуатации фильтры были засорены на 34—37% [192]. Из этого примера видно, что в ряде случаев необходимо вести исследования химизма грунтовых вод, особенно в зонах сброса промышленных отходов.

§ 8-11. Натурные исследования фильтрации из каналов

Основные вопросы, возникающие при натурных исследованиях фильтрации из каналов, следующие:

1) определение потерь воды на фильтрацию из каналов;

2) определение формы грунтового потока при фильтрации из каналов;

3) исследование влияния фильтрации из каналов на режим грунтовых вод в данном районе.

Эти вопросы имеют не только значение при оценке работы каналов в данный момент времени, но особенно важны при составлении прогноза гидравлического и солевого режимов грунтовых вод. Известно, что изменение естественного режима грунтовых вод при работе каналов может происходить длительный промежуток времени, исчисляемый иногда годами.

Определение потерь воды на фильтрацию из деривационных каналов, подводящих воду к гидростанциям и оросительным сетям, — весьма важный вопрос, связанный с экономикой народного хозяйства. Величины потерь на фильтрацию из каналов могут достигать весьма существенных размеров. Например, из ирригационной практики известно, что на поля поступает иногда лишь 50% от объема воды, забранного из источников. Потери на фильтрацию из деривационных каналов гидроэлектростанций в случаях расположения каналов в водопроницаемых грунтах снижают к. п. д. электростанций, и с этой точки зрения определение этих потерь представляет интерес.

Определение форм грунтовых потоков при фильтрации из каналов тесно связано с определением потерь на фильтрацию из каналов, а также с исследованием режима грунтовых вод в районе расположения каналов.

При наполнении канала водой форма грунтового потока весьма сильно изменяется во времени. С. Ф. Аверьянов, пользуясь данными наблюдений и литературными источниками [82], рассматривает следующие стадии фильтрации из каналов.

1. Стадия смачивания грунта, характеризующаяся впитыванием воды из канала в сухой грунт. Продвижение влаги происходит в основном в вертикальном направлении, но наблюдается некоторое рассасывание в стороны благодаря действию капиллярных сил. Область движения воды является зоной неполного насыщения.

Эта стадия продолжается до момента смыкания воды с капиллярной каймой естественного грунтового потока.

2. Стадия капиллярно-грунтового потока. Поток грунтовой воды, просачивающейся из канала, смыкается с естественным грунтовым потоком, образуя с ним одно целое. Вокруг смоченного периметра канала образуется зона полного насыщения, которая соединяется с естественным грунтовым потоком посредством зоны неполного насыщения. В последней зоне наблюдается давление, меньшее атмосферного.

3. Стадия сплошного потока грунтовых вод наступает по мере подъема поверхности естественных грунтовых вод, причем зона вакуума исчезает и образуется сплошной поток грунтовых вод.

При глубоком залегании естественных грунтовых вод и при наличии сильно водопроницаемого пласта в однородном грунте

происходит так называемая свободная фильтрация из канала. Соответствующая схема показана на рис. 8-35. Фильтрация на некотором расстоянии от канала становится равномерной с градиентом напора $I=1$. Такая предельная схема, редко встречающаяся в натуре, характеризуется максимальным фильтрационным расходом, который, согласно исследованию В. В. Ведерникова, можно определить посредством формулы:

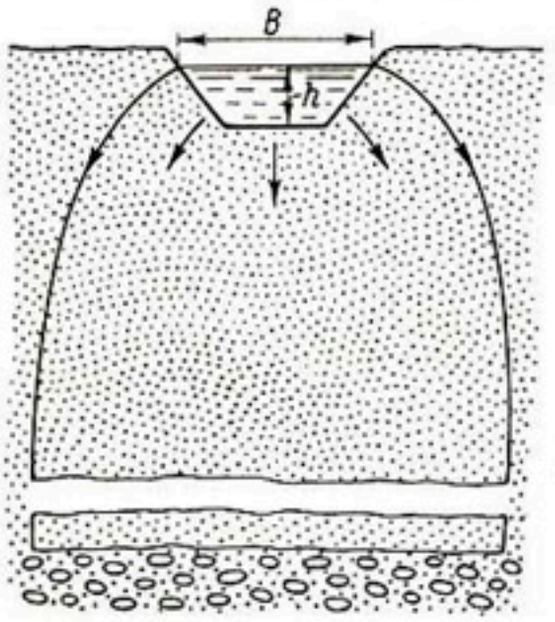


Рис. 8-35. Схема свободной фильтрации из канала.

$$q_r = B + Ah, \qquad (8\text{-}24)$$

причем B — ширина сечения трапецеидального канала по верху; h — глубина воды в канале; q_r — приведенный к $k=1$ фильтрационный расход на единицу длины канала; A — коэффициент, изменяющийся в зависимости от B/h, и коэффициента откосов канала, определяемый по графику [12]. Коэффициент A практически обычно изменяется в пределах 2—3. При наличии естественного грунтового потока, как сказано выше, грунтовой поток из канала сливается с ним, в результате чего фильтрация из канала не будет свободной, а зависит от формы естественного потока. Такая фильтрация из канала часто называется подпертой. На рис. 8-36 изображен случай подпертой фильтрации из канала. Естественный грунтовой поток имеет уклон, вследствие чего фильтрационный поток из канала не является симметричным. Возможные формы линий тока схематически показаны на рисунке стрелками. На рис. 8-37 представлена возможная схема подпертой фильтрации из канала при наличии горизонтальной дрены.

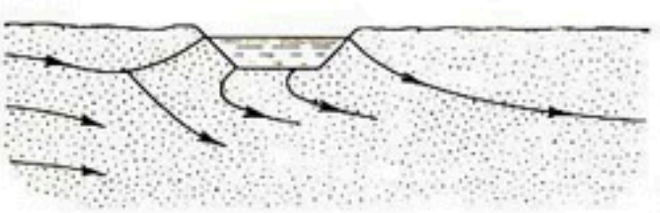


Рис. 8-36. Схема подпертой фильтрации из канала.

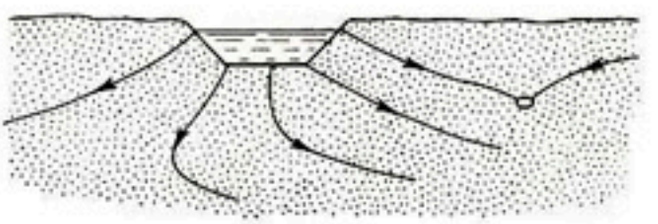


Рис. 8-37. Схема фильтрации из канала при наличии дрены.

Формы фильтрации из каналов достаточно многообразны. Даже при однородном грунте, что встречается нечасто, эти формы определяются весьма разнообразными границами области фильтрации и граничными условиями. На форму сво-

бодной поверхности при установившейся фильтрации из канала влияют: форма водоупора, расположенные поблизости водотоки и водоемы, дренажные системы, инфильтрация с поверхности земли, испарение со свободной поверхности грунтовых вод и т. д.

Для характерных случаев фильтрации из каналов в СССР получен ряд теоретических решений, начиная с 1934 г., разными авторами: В. В. Ведерниковым, С. Н. Нумеровым, С. Ф. Аверьяновым и другими [12, 82]. Полученные теоретические решения, конечно, не дают возможности точно определить форму грунтового потока в каждом отдельном случае, но они являются направляющими при проведении натурных исследований, давая возможность заранее предвидеть качественную характеристику грунтового потока.

В § 3-2 даны соображения по поводу размещения наблюдательных скважин на площадях орошения и в связи с этим приведены некоторые указания по наблюдениям за пьезометрическими уровнями. Было сказано, что близ канала расстояния между пьезометрическими скважинами уменьшаются, так как именно в непосредственной близости от канала свободная поверхность грунтовых вод имеет наибольшие уклоны и при перерывах в работе канала эта поверхность претерпевает наибольшие высотные изменения. Возьмем для примера кривые депрессии для одного из створов канала в Голодной степи [82]. На расстоянии до 500 *м* от оси канала уровень грунтовых вод при наполнении канала изменился за 29 месяцев более чем на 3 *м*, а на расстоянии 6 *км* это изменение было порядка 0,5 *м*. Этот факт подтверждается теоретическими решениями задач неустановившейся фильтрации, по которым и скорость подъема грунтовых вод быстро затухает с удалением от источника питания.

На основании данных одновременных замеров уровней воды в наблюдательных скважинах строятся кривые депрессии для разных пьезометрических створов.

Следует заметить, что на небольшом расстоянии от канала линии тока в плане обычно будут близки к прямым, перпендикулярным оси канала. Но по мере удаления от канала линии тока могут значительно искривляться и, следовательно, фильтрация отклоняется от плоской. Поэтому правильное представление о характере фильтрации грунтовых вод в районе канала дают не кривые депрессии, построенные по пьезометрическим створам, а карты гидроизогипс грунтового потока.

В районах орошения существенный интерес представляют вопросы заболачивания и засолонения территорий. Первый вопрос решается непосредственно по данным о гидравлическом режиме грунтовых вод, т. е. по картам гидроизогипс и графикам колебаний уровней грунтовых вод в характерных наблюдательных точках. Вопрос о засолонении связан с подъемом

грунтовых вод (§ 8-10). В связи с этим при натурных наблюдениях за фильтрацией на мелиоративных системах проводятся исследования минерализации грунтовых вод. С этой целью на основании химического анализа проб воды, взятой из скважин, составляются графики изменения во времени химического состава грунтовых вод. Используются и другие способы изображения минерализации [101].

Характерными чертами гидродинамического режима грунтовых вод в районах орошения являются многолетние и сезонные колебания уровней грунтовых вод. Первые из названных колебаний обусловлены изменением годового питания, зависящим от подземного стока и забора воды ирригационной системой. Таким образом, многолетние колебания в районах орошения зависят от естественных и искусственных факторов. Вторые из названных колебаний зависят от поливного режима на орошаемой территории. В районах расположения каналов, подводящих воду к гидростанциям, а также судоходных каналов, подобных сезонных колебаний, ввиду относительной стабильности работы каналов, не наблюдается.

Что касается режима грунтовых вод под орошаемыми массивами, то он подвергался подробному изучению и классификации [82]. Неустановившийся режим грунтовых вод, характеризуемый ежегодным изменением их уровней в сторону понижения или повышения, вызывает особый интерес при натурных исследованиях. Эти исследования дают возможность составления прогноза и разработки методов управления грунтовыми потоками путем осуществления соответствующих технических, хозяйственных и агротехнических мероприятий. Подобные мероприятия, в частности дренаж, предотвращают подтопление территорий грунтовыми водами, а также их засоление.

Потери воды на фильтрацию из каналов определяются в натурных условиях различными способами. Существующие расчетные формулы для определения потерь на фильтрацию из каналов, как показывает опыт, часто дают значительные отклонения величины расчетного фильтрационного расхода от действительного. Это объясняется не структурой формул. При правильно заданных граничных условиях и коэффициентах фильтрации грунтов потери на фильтрацию из каналов могут быть определены с достаточной точностью или по теоретическим формулам или, если область фильтрации сложена из неоднородных грунтов, по методу ЭГДА. Но основной причиной указанных отклонений является неточное определение коэффициентов фильтрации грунтов.

Вопросу определения коэффициентов фильтрации при проектировании каналов придается большое значение, разрабатываются способы определения коэффициентов фильтрации применительно к условиям орошаемых территорий. Однако в практике наблюдаются существенные изменения величин коэффици-

ентов фильтрации в результате действия фильтрации, как это, например, было замечено в орошаемом массиве Голодной степи [45]. Поэтому теоретическое определение потерь на фильтрацию из каналов иногда дает значительные погрешности.

В этих условиях натурные исследования потерь приобретают особое значение.

Потери воды на фильтрацию из канала на некотором опытном участке могут быть определены путем замера расходов Q_A и Q_B в начальном сечении канала A и в конечном сечении B. Тогда средний удельный расход на фильтрацию на этом участке

$$q = \frac{Q_A - Q_B}{L}, \tag{8-25}$$

где L — длина опытного участка. Расходы Q_A и Q_B могут быть замерены двумя способами. Первый способ основан на определении расхода при помощи водомеров. Водомеры на каналах представляют собой обычно водосливы. Путем замера напора водослива определяется по известной формуле расход, причем коэффициент расхода водослива предполагается известным.

Второй способ определения расходов основан на измерении скоростей в гидрометрических створах в сечениях A и B. Измерение производится гидрометрическими вертушками. Зная скорость потока, при помощи известного способа определяются расходы Q_A и Q_B. Этот способ дает достаточную точность при сравнительно большом расстоянии L.

Фильтрационный расход в данном сечении канала может быть определен на основании данных о форме кривой депрессии в этом сечении. Однако формы потоков при фильтрации из каналов довольно сложны и далеко не всегда можно подобрать из существующих решений подходящее к данному случаю. Кроме того, все имеющиеся решения даны для однородного грунта. Можно, конечно, исходя из существующих данных о форме кривой депрессии и границ, получить экспериментальное решение, например, при помощи метода ЭГДА, но и в этом случае необходимо знать величины коэффициента фильтрации грунтов, в которых происходит фильтрация.

Если известен коэффициент фильтрации и имеется водоупор, близкий к горизонтальному, то определение фильтрационного расхода в створе, оборудованном пьезометрическими скважинами, производится просто — по известной формуле Дюпюи:

$$q = \frac{k\left(h_1^2 - h_2^2\right)}{2l}, \tag{8-26}$$

где q — удельный расход (односторонний); h_1 и h_2 — глубины потока в сечениях *1* и *2*, находящихся на расстоянии l друг от друга (рис. 8-38) и достаточно удаленных от откоса канала, например на 3—4 глубины потока в начале. Последнее условие

желательно соблюдать вследствие потерь напора на изгиб потока в зоне, расположенной близ сечения канала.

При наличии симметричной подпертой фильтрации из канала и весьма глубоком залегании водоупора приведенный к $k=1$ фильтрационный расход q_r может быть определен из формулы С. Н. Нумерова [12]:

$$y = 0{,}73q_r \lg\left(A + \sqrt{A^2+1}\right), \qquad (8\text{-}27)$$

причем

$$A = \frac{2x - q_r}{B - q_r},$$

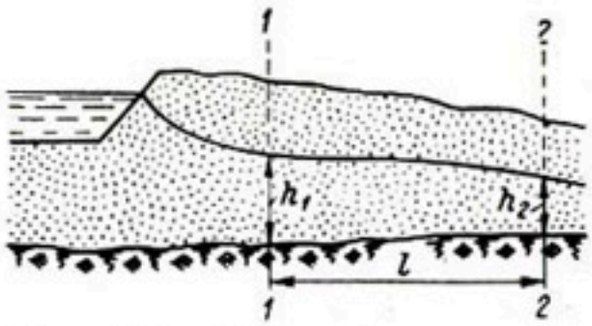


Рис. 8-38. Схема фильтрации из канала при наличии водоупора.

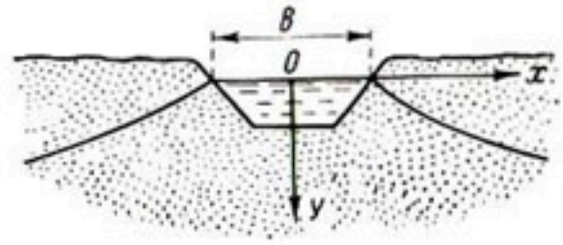


Рис. 8-39. Схема подпертой фильтрации из канала при глубоком залегании водоупора.

x и y — координаты какой-либо точки кривой депрессии (рис. 8-39); B — ширина сечения канала по верху. Уравнение (8-27) решается относительно q_r путем последовательных приближений или графически, зная из натурных наблюдений координаты x и y любой точки на кривой депрессии.

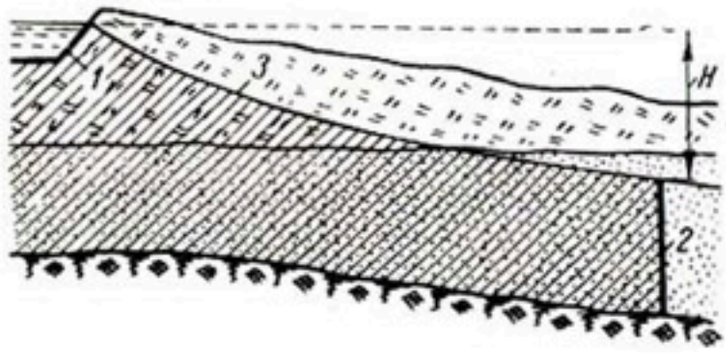


Рис. 8-40. Схема модели области фильтрации.

1 и *2* — электроды; *3* — кривая депрессии.

Не имея возможности приводить здесь другие решения, которые позволяют определить фильтрационный расход из каналов и которые изложены в ряде книг [12, 82 и др.], остановимся на использовании метода ЭГДА для определения фильтрационного расхода. Положим, что имеются данные о форме пластов и их коэффициентах фильтрации, а также известна форма кривой депрессии из натурных наблюдений. Тогда, ограничивая модель из электропроводного материала линиями поверхности водоупора, поперечного профиля канала, а также кривой депрессии, изготавливаем модель с учетом разнородности грунтов. Подобная плоская модель показана на рис. 8-40, где ее поверхность заштрихована. Присоединяя модель к цепи при помощи

электродов *1* и *2* и определяя электрическое сопротивление модели $R_м$, определяем удельный фильтрационный расход по известной формуле:

$$q = \frac{k\rho H}{\delta R_м}, \qquad (8\text{-}28)$$

где k — коэффициент фильтрации грунта; ρ — удельное сопротивление и δ — толщина модели. Если выражать k в *см/сек*, H — в *см*, ρ — в *ом/см*, $R_м$ — в омах и δ — в *см*, то q получится в *см²/сек* на 1 пог. *см* ширины потока. Все названные величины берутся для любой одной и той же зоны модели.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ПРОГНОЗЕ И АНАЛИЗЕ АВАРИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

§ 9-1. Общие сведения о надежности гидротехнических сооружений

Вопрос о надежности машин получил в настоящее время значительное теоретическое развитие. Однако вопрос о надежности гидротехнических сооружений остается открытым.

Из многих определений понятия надежности систем к гидросооружениям, по-видимому, наиболее подходит следующее: надежностью гидросооружения называется его способность сохранять свои характеристики в заданных пределах при определенных условиях эксплуатации [130]. Такое определение надежности имеет качественный характер.

Количественные критерии надежности гидротехнических сооружений исследованы мало, и ни один критерий не в состоянии полностью характеризовать надежность.

Конструкция гидротехнических сооружений, характер их оснований, режим эксплуатации и другие условия их работы чрезвычайно разнообразны. Невозможно встретить два сооружения, имеющих одинаковые условия работы и одинаковую конструкцию. Это обстоятельство сильно затрудняет анализ надежности гидротехнических сооружений, так как ряд критериев надежности можно получить лишь при помощи статистических методов, которые предполагают одинаковость объектов.

Остановимся на характере аварий или повреждений элементов гидротехнических сооружений и их оснований. Аналогично так называемым «отказам» в теории надежности автоматических систем повреждения могут быть закономерными и случайными. Закономерные повреждения могут быть предсказаны заранее. Например, выщелачивание цементационной завесы, образование карстов в основании плотины из-за химической суффозии и т. д.

Чаще всего происходят повреждения случайные, место и время которых предсказать трудно. К таким повреждениям от-

носятся, например, образования фильтрационных ходов в основаниях и береговых сопряжениях бетонных плотин.

Повреждения гидротехнических сооружений могут быть независимыми и зависимыми. Повреждение элемента будет независимым, если оно не вызывается повреждением других элементов. Повреждение, возникающее в результате других повреждений, называется зависимым.

Предположим, что имеется повреждение обратного фильтра земляной плотины, например его засорение. В результате происходит повышение кривой депрессии, при котором грунтовая вода выходит на низовой откос. При этом возникает вынос частиц грунта из тела плотины и повреждение низового откоса, которое, таким образом, является повреждением зависимым.

Анализ происшедших разрушений плотин показывает существование в каждом случае цепи зависимых повреждений.

Основные причины повреждений гидротехнических сооружений:

1) ошибки, допущенные при проектировании;
2) ошибки, допущенные при производстве работ;
3) недоброкачественные строительные материалы;
4) ошибки, допущенные при гидрогеологических и гидрологических исследованиях, или недостаточность этих исследований;
5) стихийные причины (наводнение, ураганы, землетрясения) или разрушение вышерасположенных гидросооружений;
6) ошибки, допущенные при эксплуатации гидросооружений, отсутствие своевременных ремонтных работ;
7) повреждения, причиняемые людьми, животными и машинами.

Названные причины приводят к повреждениям или авариям различных видов. Поскольку нашей задачей является анализ аварий, происходящих вследствие вредного действия фильтрации, в дальнейшем будем иметь в виду лишь роль фильтрации при авариях. Некоторое сужение вопроса об авариях оправдывается тем, что, как будет подробно пояснено ниже, фильтрационный фактор почти неизменно присутствует в цепи других факторов аварий гидротехнических сооружений, а зачастую является основным. И данные наблюдений за фильтрацией в аварийных случаях почти всегда выявляют угрозу безопасности сооружений.

§ 9-2. Роль фильтрации при авариях гидротехнических сооружений

В XIX и XX вв. наблюдались многочисленные случаи разрушений гидротехнических сооружений, которые явились причиной гибели сотен людей и нанесли огромный материальный ущерб.

Однако, несмотря на исключительную важность, вопрос о причинах разрушения гидротехнических сооружений разработан далеко не достаточно. Конечно, такое положение объясняется большой сложностью анализа причин разрушений, многообразием их форм и часто недостаточностью фактических данных наблюдений за состоянием сооружений и их оснований.

Наблюдающиеся иногда тенденции к скрытию фактических материалов по авариям гидротехнических сооружений [178] наносят вред делу совершенствования теории расчета, конструирования и производства работ по возведению гидротехнических сооружений.

Классификация главнейших причин разрушения плотин дана А. А. Гельфером на основании разобранных им многочисленных случаев в литературе [40].[1] А. А. Гельфер подчеркивает, что при классификации случаев разрушения плотин гидрогеологические факторы играют доминирующую роль.

Что касается аварий гидротехнических сооружений, т. е. более или менее существенных их повреждений, то причины аварий также в подавляющем большинстве случаев обусловлены воздействием фильтрации. Особенно часто наблюдались аварии земляных плотин и дамб — мелкие и существенные.

Зачастую аварии земляных плотин происходят уже в период производства работ по их возведению.

В период 1914—1941 гг. в США был ряд аварий земляных намывных плотин. На плотине Форт-Пек высотой 68 *м* в строительный период сполз верховой откос объемом 4 млн. $м^3$ грунта, причем, как следует из заключения комиссии, грунт был разжижен. Ряд крупных аварий в США привел к тенденции отказа от намывных плотин.

Следует отметить, что при производстве работ обращалось недостаточное внимание на фильтрацию во время намыва.

Такое положение имело место и в практике отечественного строительства намывных плотин.

В результате неоднородности тела плотины и образования слабоводопроницаемых прослоек возникало высачивание грунтовых вод на высоких отметках низового откоса. Некоторые случаи приведены в § 9-5.

Недостаточный контроль над фильтрацией при производстве работ по сооружению земляных плотин служил неоднократной причиной аварии и нарушений.

При строительстве Никопольской дамбы в 1965 г. имел место оползень низового откоса из-за незавершенной консолидации иловатых суглинков основания [108].

Весьма поучительный пример приведен в [90], где описан случай быстрого разрушения плотины в 1956 г. Под сводом

---

[1] Позднейшие литературные источники в труде А. А. Гельфера датированы 1935 г.

промерзшего грунта после осадки нижележащей, недостаточно уплотненной насыпи из суглинка в плотине образовался фильтрационный ход, по которому через короткое время произошел прорыв плотины.

Анализ причин аварий и разрушений элементов профиля земляных плотин в США показывает, что 40% случаев этих нарушений произошло, в конечном счете, вследствие фильтрации.

М. М. Гришин считает, что 45% аварий и разрушений земляных плотин произошло вследствие недостаточности мер по борьбе с фильтрацией и около 15% аварий является результатом оползания откосов, вызываемого большей частью также действием фильтрации [50]. Примерно те же цифры вытекают из анализа данных, проведенных американскими исследователями за последние годы [229]. Если не считать аварий, происшедших вследствие перелива воды через гребень земляных плотин, что особенно характерно для плотин малой высоты, то роль фильтрации при авариях является превалирующей.

Вредное действие фильтрации на гидротехнические сооружения проявляется различно, в частности в форме суффозии слабых грунтов тел и оснований сооружений, а также берегов водохранилищ, образования слабопроницаемых прослоек и засорения дренажей при намыве, развития фильтрации по контакту тела плотины с основанием и т. д.

Разрушение гидротехнических сооружений обычно представляет собой сложный процесс, в котором можно выделить ряд последовательных явлений, находящихся между собой в причинной связи. В цепи этих явлений обычно имеется фильтрация.

Разумеется, рассматривая вредные действия фильтрации на гидротехнические сооружения, мы должны установить, какое именно место в совокупности обстоятельств аварии они занимают. Иначе говоря, необходимо установить причинно-следственную связь различных явлений, совокупность которых приводит к аварийному состоянию или разрушению сооружения.

Весьма важно еще и то, что, поскольку вредное действие фильтрации на гидротехнические сооружения, как сказано выше, зачастую является важнейшим обстоятельством, обусловливающим аварию или разрушение сооружения, то натурные исследования фильтрации при правильной их обработке во многих случаях позволяют судить о надежности сооружения. На основании литературных источников можно сделать вывод, что при аварийном состоянии гидротехнических сооружений фильтрационный режим почти всегда имел отклонения от нормального.

Натурные исследования фильтрации при наличии аварийных признаков гидротехнических сооружений направлены в первую очередь на предупреждение аварий.

Установление и оценка аварийных признаков позволяет вовремя принять необходимые меры по обеспечению безопасности

сооружения. В практике эксплуатации гидротехнических сооружений нередко приходится предупреждать вредные последствия фильтрации путем развития дренажных систем, искусственной кольматации оснований, устройства цементационных завес и т. д.

Если авария или разрушение сооружения уже произошли, то этот печальный факт необходимо всесторонне изучить и выделить его специфическую причину, которая обычно состоит из ряда компонентов. История разрушения сооружений имеет немало поучительных выводов в отношении конструкции сооружений, производства работ и эксплуатации.

Некоторые классические случаи разрушения гидросооружений повлияли на технические воззрения проектировщиков и строителей на роль гидрогеологических изысканий, так как недостаточность гидрогеологических данных при проектировании гидротехнических сооружений часто была причиной их разрушений [40].

§ 9-3. Главнейшие виды вредного действия фильтрации на гидротехнические сооружения

Действие фильтрации на гидротехнические сооружения проявляется в разнообразных формах, доступных визуальным наблюдениям в натуре или же обнаруживаемых при помощи приборов.

Основываясь на данных литературных источников, описывающих аварии и разрушения гидротехнических сооружений, можно дать следующую краткую классификацию главнейших видов вредного действия фильтрации на сооружения:

1) образование фильтрационных ходов в основаниях гидротехнических сооружений вследствие механической суффозии;

2) образование фильтрационных ходов в теле земляных плотин и дамб вследствие механической суффозии;

3) вынос частиц грунта основания гидротехнического сооружения или тела земляной плотины в дренажные устройства;

4) заиление обратных фильтров;

5) уменьшение устойчивости низовых откосов земляных плотин вследствие подъема кривых депрессии;

6) химическая суффозия оснований сооружений и берегов;

7) суффозия ядер земляных плотин;

8) размыв противофильтрационных завес;

9) нарушение непроницаемости шпунтовых стенок и диафрагм;

10) выщелачивание бетона;

11) нарушение устойчивости земляных намывных плотин и дамб вследствие медленной консолидации намытого грунта;

12) нарушение устойчивости (выпучивание) обделок подземных сооружений (водоводов).

Повреждения или аварии гидротехнических сооружений протекают во времени с различной интенсивностью.

Некоторые процессы, например размыв противофильтрационных завес или вынос грунта в защищающие его обратные фильтры, обычно происходит сравнительно медленно. Образование карстов в основаниях сооружений вследствие химической суффозии обычно длится годами. Подобные процессы могут быть замечены и основательно проанализированы. На основании анализа могут быть своевременно выработаны противофильтрационные мероприятия.

В некоторых случаях, имевших место в практике, авария или даже разрушение гидротехнических сооружений происходят достаточно быстро. К таким случаям относятся, например, образования фильтрационных ходов в основаниях гидросооружений вследствие недостаточно плотного контакта тела массивного гидросооружения с основанием или с земляным сооружением, недостаточной суффозионной устойчивости грунта. Однако и в этих случаях объективные данные наблюдений должны своевременно свидетельствовать об угрожающем положении сооружений, так как обычно всякое опасное повреждение сооружения является зависимым от ряда факторов, которые при существующем развитии теории и методики наблюдений обычно доступны анализу надежности.

Большая часть названных выше видов вредного воздействия фильтрации на гидротехнические сооружения рассмотрена в главах 7 и 8. Ниже рассмотрим такие виды вредного действия фильтрации на сооружения, в результате которого могут произойти различные аварии и разрушения сооружений. Ввиду сложности анализа встречающихся аварий и разрушений будем основываться на случаях, имевших место в практике.

§ 9-4. Образование фильтрационных ходов в гидротехнических сооружениях и их основаниях

Образование фильтрационных ходов в гидротехнических сооружениях и их основаниях свидетельствует о наличии в неоднородной толще оснований ослабленных зон, в которых имеются относительно сильно водопроницаемые прослои грунта или трещины.

При наличии соответствующих градиентов напора, которые являются критическими в отношении механической суффозии для данной ослабленной зоны (§ 7-4), в ней происходит вынос частиц грунта, увеличение пористости и, в конечном счете, возникают фильтрационные ходы. Фильтрационный ход может образоваться в толще основания в зоне больших градиентов. Тогда он обычно является замкнутым, не выходящим в нижний бьеф. Такое образование, происшедшее в результате внутренней суффозии, неопасно для сооружения, если, конечно,

поперечные размеры хода невелики. Обнаружить замкнутый фильтрационный ход в толще основания затруднительно.

Часто в существующих сооружениях обнаруживаются местные тупиковые фильтрационные ходы, выходящие в нижний бьеф (рис. 9-1). Такие ходы могут иметь небольшую длину и иногда боковые ответвления. Эти фильтрационные ходы образуются в зоне выхода грунтовых вод в нижний бьеф при

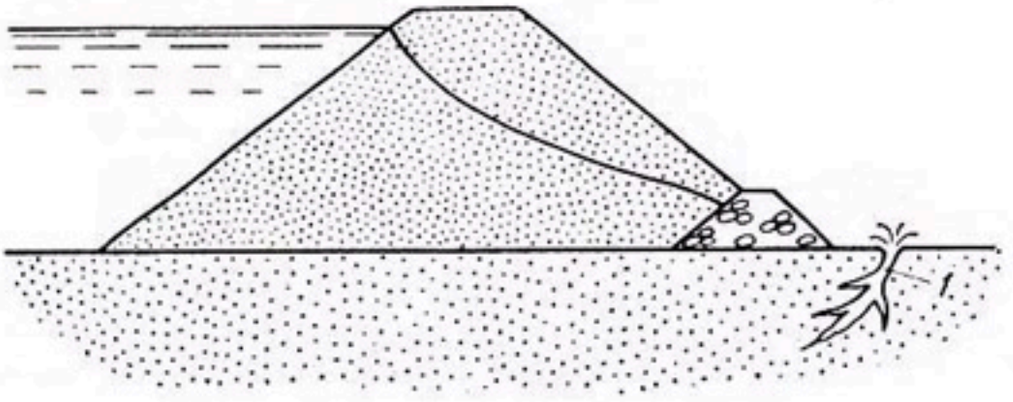


Рис. 9-1. Схема образования местного тупикового фильтрационного хода (*1*) в основании плотины.

наличии значительных градиентов напора. Линии равных напоров искривляются вокруг фильтрационного хода, и он становится стоком, дренирующим в известной степени окружающий его грунт.

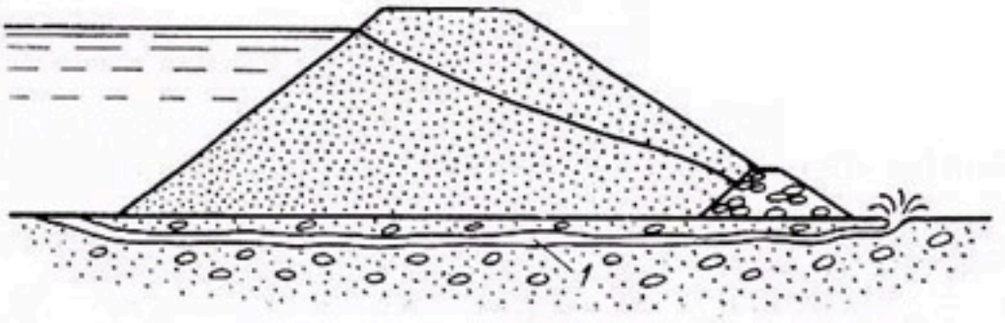


Рис. 9-2. Схема образования сквозного фильтрационного хода (*1*) в основании плотины.

В отличие от сквозного фильтрационного хода (рис. 9-2) общий фильтрационный расход под гидротехническим сооружением при образовании тупикового хода практически не увеличивается. Тупиковый ход лишь концентрирует известную часть фильтрационного расхода..

Образование тупиковых фильтрационных ходов может быть обусловлено наличием в толще основания пласта с относительно большой проницаемостью, соединяющегося с верхним бьефом (рис. 9-3). Такой случай описан в работе [37]. При обследовании намывной дамбы авторы наблюдали целый ряд ключей, выходящих на дне и откосе дренажной канавы. Небольшие ключи,

соединенные в группы, образовали интенсивные очаги фильтрации с выносом мелких частиц грунта.[1] Исследование показало, что подобные существенные очаги фильтрации возникали в супеси при градиентах напора около 0,45.

Таким образом, в данном случае происходило образование фильтрационных ходов небольшой длины в кровле основания.

Образование ключей в теле и основании земляных плотин вообще происходит в результате наличия местных слабых в отношении суффозии зон грунта. При проектировании плотин весьма трудно учесть наличие таких зон в основании, так как ввиду малости размеров этих зон и сложности их исследования обнаружить их при изысканиях практически невозможно. По-

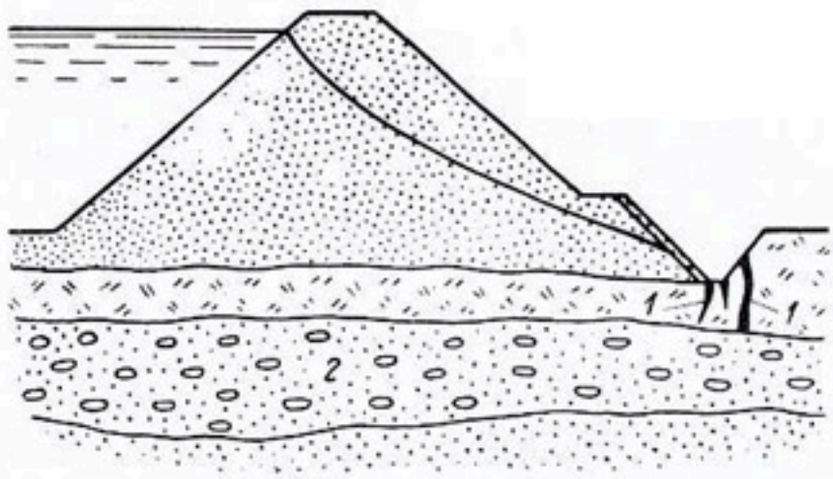


Рис. 9-3. Схема образования фильтрационных ходов (*1*) при наличии сильноводопроницаемого слоя (*2*) в основании плотины.

этому возникновение ключей в основании плотин носит случайный характер. Однако при изучении гидрогеологических условий возможно заранее наметить зону вероятного возникновения ключей.

Появление ключей в теле плотины связано с образованием слабых в отношении суффозии зон при производстве работ. В особенности опасны контактные зоны, где тело земляной плотины сопрягается с бетонными поверхностями — бычками, водоспусками и т. д. Недостаточное уплотнение грунта в пазухах, расслоение грунта при отсыпке плотин или неравномерная осадка сооружения влекут за собой возникновение фильтрационных ходов с последующим размывом грунта, приводящим иногда к серьезным авариям [85].

Сосредоточенные фильтрационные ходы должны подвергаться подробному исследованию. Их расположение должно быть зафиксировано. По возможности измеряется их расход в течение

---

[1] В практике исследований подобные образования часто называются грифонами — название, которое едва ли имеет обоснование.

года, например, при помощи водослива, и строятся графики изменения расхода в зависимости от отметки уровня верхнего бьефа. Весьма важно иметь сведения о количестве выносимых водою частиц грунта, так как наличие таких частиц свидетельствует о происходящем размыве основания и требует разработки проекта дополнительных противосуффозионных и дренажных мероприятий. Обычно первоочередные мероприятия заключаются в устройстве дренажа в местах выхода ключей, засыпке дренирующим материалом мест выхода ключей, отвора профильтровавшейся воды и т. д.

Фильтрационные ходы появляются в берегах — в зонах береговых примыканий плотин. Иногда вслед за их появлением возникают оползни откосов берегов [187]. Появление ключей в поймах ведет к заболачиванию.

Наиболее опасно образование фильтрационных ходов непосредственно у подошвы сооружения. Мы не имеем детальных объективных данных о характере грунтов оснований с точки зрения их фильтрационной прочности, о характере контакта массивных частей сооружения с основанием, зависящего от деформаций сооружения, и обстоятельств, сопутствующих производству работ, и т. д. Поэтому при существующем уровне знаний образование фильтрационных ходов в основаниях сооружений носит случайный характер.

В свое время возникли известные расчеты фильтрационной прочности Бляя и Лена, основанные на статистической обработке наблюдений за существующими сооружениями, расчеты, которые в настоящее время модернизируются и рекомендуются некоторым гидротехниками [184].

Причины образования фильтрационных ходов под гидротехническими сооружениями различны и часто трудновыяснимы. Так, при разрушении Долгарроrской плотины в Англии, характеризуемом выносом глинистого грунта из-под основания плотины, по-видимому, играло специфическую роль образование трещин в глине ввиду очень сухой погоды [178].

Фильтрационные ходы часто образуются в местах сопряжения массивных плотин с земляными дамбами, в местах резкого изменения профиля массивных плотин. В связи со сказанным заметим, что, например, разрушение земляной плотины Кюддов в Германии в 1930 г. в значительной степени объясняется образованием сосредоточенной фильтрации в месте сопряжения стенки водоспуска с земляной насыпью [40].

Аналогичное явление имело место при разрушении в 1930 г. плотины Ла Фрута в США, причем, как показывают исследования [40], фильтрационные ходы могли образоваться как вдоль плоскости устоя в сопряжении его с телом земляной плотины, так и в основании сооружения вследствие неодинаковой осадки земляной плотины и устоя водоспуска. Поэтому весьма желательно устанавливать пьезометры в местах сопряжения массив-

ных стен гидросооружений с земляными насыпями, а также в местах изменения поперечного профиля сооружений.

Неоднородность пластов, слагающих основания, может служить причиной образования фильтрационных ходов. При разрушении плотины Аустин (США) весьма существенную роль играли сосредоточенные фильтрационные токи в трещиноватых незацементированных песчаниках, переслаивающихся с глинистыми сланцами. Эти токи ослабили основание, по которому произошел сдвиг плотины [53].

До сих пор мы имели в виду образование фильтрационных ходов вследствие механической суффозии. Однако в ряде случаев возникновение сосредоточенной фильтрации обусловлено химической суффозией, т. е. выносом из грунта основания растворимых веществ. В основаниях и бортах ряда плотин, судоходных шлюзов и гидростанций залегают растворимые породы, например известняки, гипсоносные суглинки и т. д. При наличии интенсивной фильтрации, обусловленной подпором от гидросооружений, в грунте оснований происходит выщелачивание. В результате этого процесса образуются выщелаченные зоны, в которых величина коэффициента фильтрации резко возрастает. В этих зонах возможны осадки сооружений. При свободном оттоке воды, содержащей растворимые вещества, с течением времени развивается механическая суффозия, опасная для устойчивости сооружений [164].

Процесс химической суффозии был нередко причиной серьезных катастроф гидросооружений. При разрушении бетонной плотины Сан-Френсис в США в 1927 г., вызвавшем гибель многих людей и большие убытки, решающее значение имела химическая суффозия гипсоносного глинистого конгломерата [40].

Эффект химической суффозии ярко иллюстрируется обрушением в 1923 г. плотины Эпичапа в США. Материал тела плотины содержал растворимые вещества, которые почти два года вымывались фильтрационным потоком, образуя пустоты с сосредоточенной фильтрацией. Это вызвало сильную просадку плотины и ее обрушение [40]. Во многих случаях практики эксплуатации гидросооружений наличие сосредоточенной фильтрации по фильтрационным ходам обнаруживается визуально. В некоторых случаях на основании показаний пьезометров, анализируя изменение эпюр давления, можно вывести заключение о происходящем размыве основания. Однако решение этого вопроса зависит от естественных условий, от расположения пьезометров и ряда других обстоятельств, затемняющих картину размыва.

При визуальных наблюдениях за состоянием гидротехнических сооружений особое внимание должно быть уделено сосредоточенной фильтрации. Очаги сосредоточенной фильтрации фиксируются на чертежах сооружения. Даются их характеристики: количество, размеры, мутность, химический состав и

температура воды, расход, определяемый с возможной в данных условиях точностью. Наблюдения за очагами сосредоточенной фильтрации ведутся систематически, причем обращается особое внимание на их состояние в периоды подъема уровня воды в верхнем бьефе.

В лаборатории определяется количество вынесенных частиц грунта, химический состав воды (в случае наличия растворимых веществ в грунте) и составляются графики веса вынесенных частиц грунта или сухого остатка при химическом анализе в зависимости от времени. Эти графики затем являются основанием для построения новых зависимостей для тех же величин в функции от действующего напора на сооружении.

Подобные исследования механической и химической суффозии рассмотрены в главе 7. Они дают возможность судить о развитии процесса суффозии, являющегося главнейшим фактором образования сосредоточенной фильтрации.

§ 9-5. Подъем кривых депрессии в земляных плотинах

Наблюдения за кривыми депрессии в земляных плотинах и дамбах имеют большое значение в общем составе натурных наблюдений. Они дают возможность судить о состоянии сооружений.

Нередко в практике натурных исследований приходится встречаться со случаями повышения кривых депрессии в плотинах по сравнению с расчетными кривыми, а иногда и по сравнению с уже установившимися и наблюдаемыми ранее кривыми. Само по себе повышение кривой депрессии далеко не всегда угрожает целости плотины, однако это повышение уменьшает статическую устойчивость низового откоса плотины. Высачивание грунтовой воды на низовой откос выше дренажных слоев способствует эрозии низового откоса. Иногда в местах высачивания образуются фильтрационные ходы, из которых выносится грунт тела плотины.

Повышение кривых депрессии в плотинах вызывается весьма различными причинами. Анализ этих причин на основании натурных исследований позволяет установить степень надежности плотины в данных условиях и наметить мероприятия, повышающие надежность. Поэтому натурные наблюдения за кривыми депрессии в земляных плотинах в настоящее время общеприняты. Все крупные плотины имеют пьезометрические створы. За пьезометрами ведутся систематические наблюдения.

Основываясь на конкретных случаях повышения кривых депрессии в земляных плотинах и на анализе этих случаев, заранее можно наметить ту или иную рабочую гипотезу, которая поможет при проведении натурных исследований.

Как сказано выше, подъем кривых депрессии в земляных плотинах объясняется рядом разнообразных причин. Некото-

рые из них обусловлены естественными факторами, не учтенными при проектировании, другие являются следствием отступления от проекта производства работ при сооружении плотин или даже несоблюдения технических условий производства работ. Во всяком случае, подъем кривой депрессии — один из важнейших признаков ненормальной работы плотины. Поэтому остановимся на различных характерных случаях этого явления и их физических причинах. Для большей конкретности при этом будем иметь в виду реальные случаи повышения кривых депрессии, наблюдавшиеся в существующих плотинах.

В практике эксплуатации земляных плотин наблюдаются случаи высачивания грунтовых вод на низовом откосе на вы-

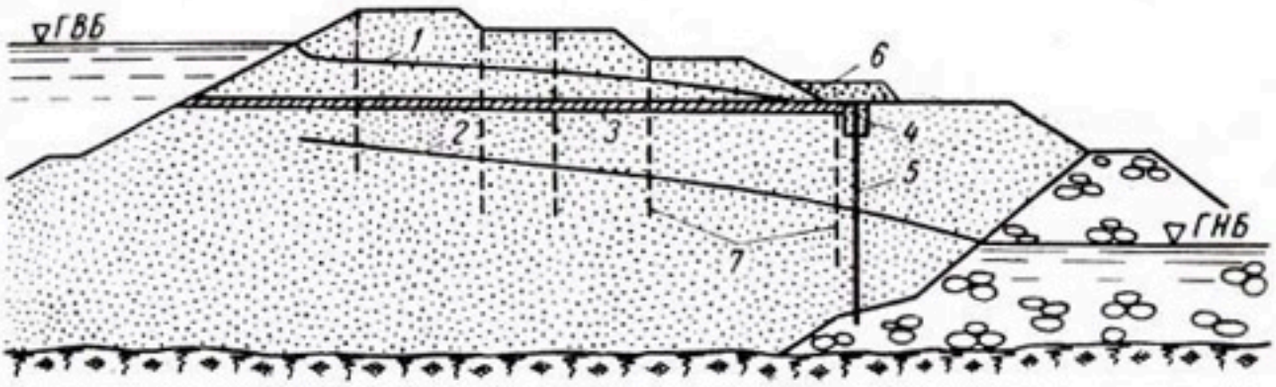


Рис. 9-4. Схема образования двух потоков в намывной плотине.

1 — верхняя кривая депрессии; *2* — нижняя кривая депрессии; *3* — слабопроницаемая прослойка; *4* — дренажная траншея; *5* — труба; *6* — пригрузка; *7* — пьезометры.

соких отметках. Это происходит чаще всего у намывных плотин.

Интересный и характерный случай имел место в намывной плотине высотой 26 *м*, в которой, как показали исследования, образовались две кривых депрессии с разностью в отметках 6,5 *м* (рис. 9-4), причем на отметке 17 *м* над плоскостью основания плотины появился выход грунтовых вод на откос с расходом до 6—7 *л/сек* [81]. Такое положение объясняется допущенными в процессе производства работ отступлениями от проекта. В основном расчленение грунтового потока обусловлено полугодовым перерывом при намыве плотины, вследствие чего в теле плотины образовалась слабопроницаемая прослойка.

Отметим, что единственным практически целесообразным мероприятием явилось снижение верхней кривой депрессии посредством дренажной траншеи и отвод грунтовой воды верхнего яруса в дренажную призму через вертикальные трубы, как это схематически представлено на рис. 9-4.

В другом характерном случае на поверхности низового откоса намывной плотины и на отметке около 20 *м* над основанием плотины при отметке горизонта воды в верхнем бьефе 21,5 *м* образовалась поверхность высачивания (рис. 9-5).

Суммарный расход ручейков на поверхности откоса достигал 1—2 *м*³/*сут* [191].

Натурное исследование плотины с бурением разведочных скважин показало наличие в теле плотины ряда супесчаных и суглинистых прослоек толщиной 2—20 *мм*. Вследствие этого основной грунтовой поток в низовой призме плотины делится на ряд отдельных потоков, из которых одни напорные, а другие безнапорные. Эти потоки высачиваются на поверхности низового откоса. Прослойки образовались вследствие несоблюдения проектных границ прудка при намыве и частых перерывов в намыве плотины из-за ремонта земснаряда.

Для устранения высачивания воды на высоких отметках на низовых откосах был применен вертикальный дренаж, который способствовал понижению кривой депрессии.

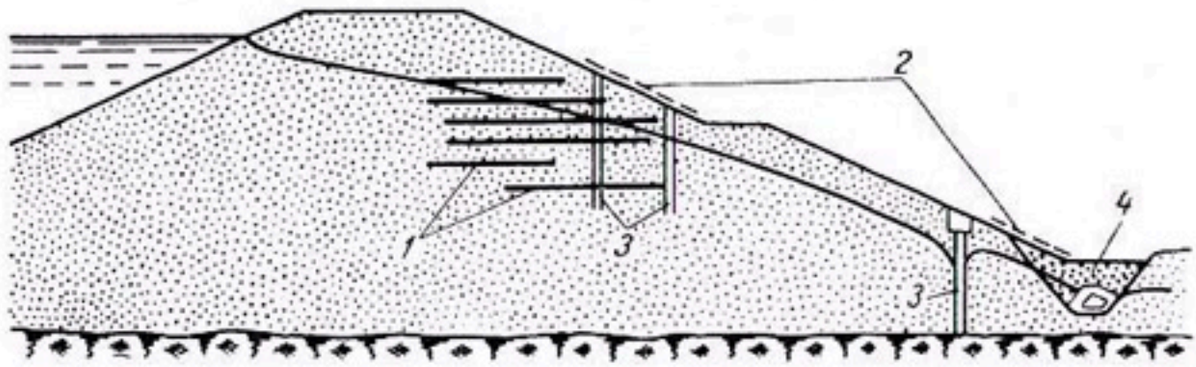


Рис. 9-5. Высачивание на откос намывной плотины.

1 — слабопроницаемые прослойки; *2* — поверхности высачивания; *3* — дренажные скважины; *4* — насыпной грунт.

Слабоводопроницаемые прослойки были обнаружены при помощи бурения разведочных скважин и шурфов. Причины же образования прослоек были установлены на основании материалов геотехнического контроля намыва плотин.

Обратимся к примеру упомянутой плотины, изображенной схематически на рис. 9-5. Помимо наличия слабоводопроницаемых прослоек, в ней было обнаружено уменьшение водопроницаемости в насыпном грунте, заполняющем дренажную траншею. В результате перед дреной произошло повышение кривой депрессии и выше дренажной траншеи кривая депрессии выклинилась на откос плотины. По материалам исполнительной документации было выяснено, что траншея засыпана грунтом из отвалов, содержащим глинистые и пылеватые частицы.

Случай подъема кривой депрессии в одной из плотин Цимлянского гидроузла был исследован Е. А. Лубочковым (ВНИИГ).

При бурении скважины дополнительного пьезометра, расположенного на небольшом расстоянии от подошвы обратного фильтра, были взяты пробы грунта. Механический анализ этих проб показал, что слой песка, лежащий на обратном фильтре,

перекрывается прослойкой глинистого мелкозернистого песка. Но и гранулометрический анализ грунта не дает полного представления о тонкой пылевато-глинистой прослойке, которую можно было выявить при исследовании проб грунта. Прослойка имела толщину 3—5 *мм*, и грунт, образовавший эту прослойку при анализе перемешался с окружающим мелкозернистым песком. При намыве плотины перед защитным слоем обратного фильтра трубчатого дренажа вдоль его оси образовался пруд-отстойник, из которого вода фильтровала в уложенный трубчатый дренаж. При этом пылевато-глинистые частицы не проходили через поры защитного слоя обратного фильтра, а кольматировали его. Образовавшаяся кольматационная зона и явилась водоупорной прослойкой, пройденной буровой скважиной.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что при сооружении земляных плотин могут образоваться тонкие водоупорные прослойки, коэффициент фильтрации которых значительно меньше коэффициента фильтрации тела земляной плотины. Эти прослойки могут существенно изменять форму грунтового потока, содействуя повышению кривой депрессии и уменьшая тем самым устойчивость сооружений. Исследование таких прослоек затрудняется ввиду их незначительной толщины. Поэтому весьма существенно установить возможность образования водоупорных прослоек на основании материалов исполнительной документации.

Иногда причиной повышения кривой депрессии является засорение дренажных устройств. На земляной плотине Цимлянской ГЭС [146] галерея внутренней дренажной призмы оказалась заполненной песком и илом в результате прорыва в дренажную призму гидросмеси из пруда-отстойника во время намыва. Это заиление было обнаружено после сдачи сооружения в эксплуатацию. Результатом заиления дренажа явилось повышение кривой депрессии.

На той же плотине наблюдалось засорение дренажных кюветов вследствие эрозии на низовом откосе плотины, происходившей под действием ливней, снеготаяния и ветров.

В связи со сказанным можно отметить, что распространенное мнение о легкости кольматации обратных фильтров дренажей, из-за неправильной методики их проектирования, в большинстве случаев не подтверждается натурными исследованиями. Причины заиления обратных фильтров дренажей, как сказано в § 7-6, чаще всего кроются в проникновении в них заиливающих частиц при недостаточно внимательном намыве или укладке некачественного грунта тела плотины близ обратных фильтров.

Одной из причин повышения кривых депрессии является занесение песком труб, отводящих воду из дренажей. Такой случай наблюдается иногда при наличии выноса грунта из тела

плотины вследствие суффозии. На Каховской ГЭС в результате перемещения песка вследствие волнения в нижнем бьефе [91] была занесена песком каменная наброска в местах выхода дрен, отводящих воду.

При неравномерной укладке грунта и недостаточном контроле иногда низовая призма плотины может оказаться менее водопроницаемой, чем верхняя часть профиля плотины. Подобные случаи наблюдались в практике [187]. В особенности рельефно проявляется повышение кривой депрессии в тех случаях, когда основания плотин сложены из слабопроницаемых пород. На рис. 9-6 изображена земляная плотина, коэффициент фильтрации верховой ее части k_1 больше коэффициента фильтрации низовой части k_2.

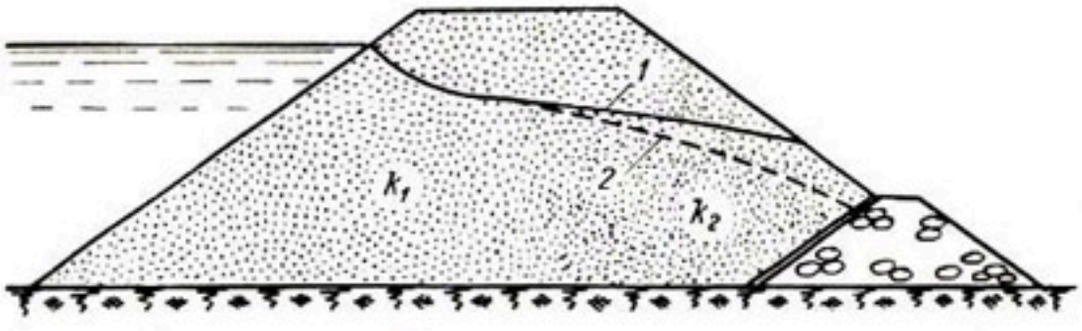


Рис. 9-6. Подъем кривой депрессии вследствие неравномерности укладки тела плотины ($k_1 > k_2$).

1 — фактическая кривая депрессии; *2* — теоретическая кривая депрессии при однородном грунте.

Высота высачивания $h_в$ на низовой откос однородной плотины с коэффициентом откоса m может быть определена по следующей приближенной формуле Г. К. Михайлова:

$$h_в = \left(m + \frac{1}{2}\right) q_r, \tag{9-1}$$

здесь q_r — приведенный расход на единицу длины плотины, т. е. $q_r = q/k$, где q — расход на единицу длины плотины. Для грубого приближения, достаточного для данной цели, можно принимать

$$q_r = \frac{h_1^2}{2l}, \tag{9-2}$$

причем h_1 — глубина воды в верхнем бьефе; l — расстояние от уреза воды до подошвы низового откоса.[1]

Если найденная теоретически величина $h_в$ значительно меньше фактической замеренной высоты высачивания, то имеет место тот рассмотренный случай, когда $k_2 < k_1$.

---

[1] Для более точного расчета q_r можно воспользоваться соответствующими формулами [12].

Неоднородность тела плотины может быть различно ориентирована. В частности, водопроницаемость грунта может изменяться по вертикали. Такой случай наблюдался в плотине Ортотокойского водохранилища. Насыпная плотина высотой 52 *м*. оказалась слоистой с переменной по вертикали водопроницаемостью [83]. Верхняя часть отсыпных слоев имела коэффициент фильтрации в среднем 22 *м/сут*, а нижняя часть 76 *м/сут*. При наполнении водохранилища оказалось, что на низовом откосе возникло высачивание воды на высоких отметках. Так, при повышении напора до 39 *м* отметка выхода воды на откос была на 7 *м* ниже отметки горизонта водохранилища. Начался суффозионный вынос мелких частиц из тела плотины. Исследования скоростей при помощи индикаторов показали, что максимальные скорости составляют 100—250 *м/сут* при коэффициенте фильтрации прослоек 500—600 *м/сут*. Создавшееся положение заставило соорудить инъекционную цементно-глинистую завесу, в результате чего кривая депрессии была резко снижена, а также значительно уменьшился фильтрационный расход.

Остановимся еще на одной причине повышения кривой депрессии в земляных плотинах. Низовой откос плотины в условиях северной местности может промерзать на значительную глубину. При повышении уровня воды в верхнем бьефе во время паводка промерзший грунт может образовать подпор грунтовых вод в теле плотины. Такой случай имел место при эксплуатации приканальных дамб одного из гидроузлов [187], где кривая депрессии располагалась достаточно близко к поверхности низового откоса. Весной грунт оттаивал и образовывались трещины, которые явились затем очагами сосредоточенной фильтрации.

Иногда повышение кривой депрессии происходит из-за наличия в теле плотины не удаленных при ее сооружении устройств, необходимых при производстве работ. В качестве примера приведем земляную плотину Каховской ГЭС, в которой наблюдалось местное повышение кривой депрессии вследствие наличия в теле плотины неразобранной продольной шпунтовой перемычки с отсыпкой из горной массы. Эта отсыпка как раз проходит в месте повышения кривой депрессии [91]. Заметим, что анализ причин повышения кривой депрессии в ряде случаев требует всесторонних и внимательных исследований. В приведенном примере Каховской плотины установление этих причин вызвало дискуссию на страницах журнала «Гидротехническое строительство».

Повышение кривой депрессии в плотине может быть обусловлено анизотропной водопроницаемостью грунта. Согласно имеющимся исследованиям коэффициента фильтрации в намывных плотинах, коэффициент анизотропии, т. е. отношение коэффициента фильтрации в горизонтальном направлении $k_г$ к коэффициенту фильтрации в направлении вертикальном $k_в$,

колеблется в небольших пределах, составляя по исследованиям ВНИИГ в среднем $k_г/k_в=2$.

Исследования велись, в частности, на Каховской и Кайракумской плотинах. Образцы грунтов брались из глубоких шурфов (7—10 *м*) при помощи режущего цилиндра в различных по отношению к напластованию направлениях. Однако имелись случаи, когда $k_г/k_в=12$, правда, это значение наблюдалось лишь в некоторых зонах профилей плотин.

Наличие анизотропной водопроницаемости тела плотины является причиной повышения кривой депрессии. Действительно, согласно известной зависимости, применяемой для приведения анизотропной области фильтрации к изотропной [7], длину l в формуле (9-2) следует уменьшить в $\sqrt{k_г/k_в}$ раз, т. е. вместо l

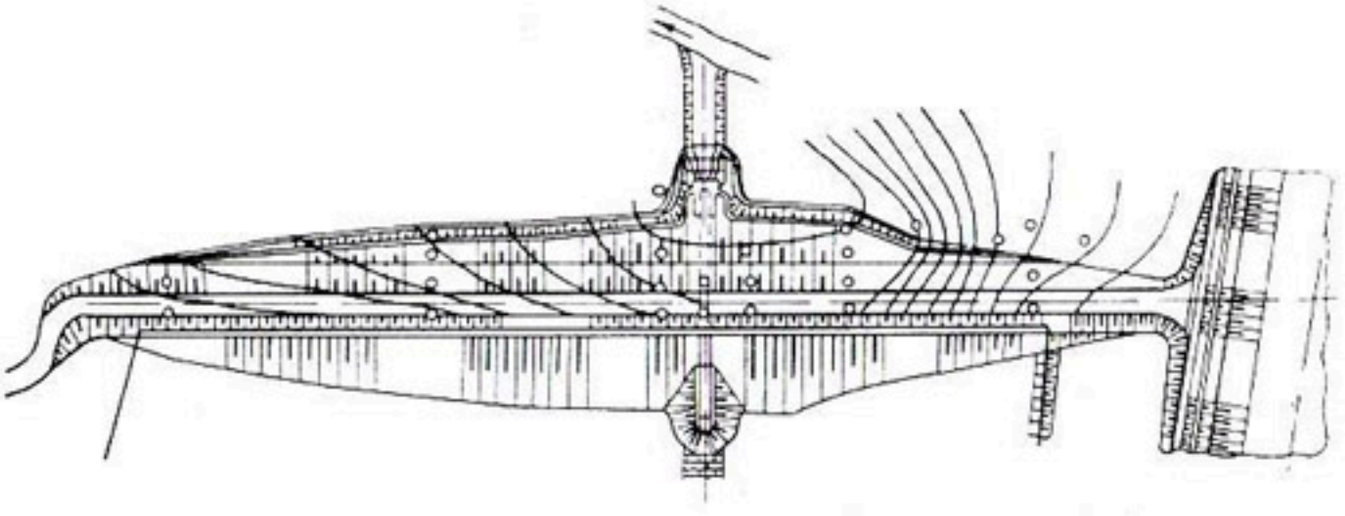


Рис. 9-7. Гидроизогипсы в земляной плотине с экраном.

в указанную грубо приближенную формулу подставить величину $l\sqrt{k_в/k_г}$. Но тогда высота высачивания $h_в$ по формуле (9-1) увеличится в $\sqrt{k_г/k_в}$ раз. Если даже принять среднее значение $k_г/k_в=2$, то $h_в$ увеличится в 1,4 раза.

А. А. Угинчус [171] и П. А. Шанкин [187] отмечают существенное влияние фильтрации в обход береговых примыканий земляных плотин на режим фильтрации в плотинах. Грунтовой поток в берегах существенно влияет на форму грунтового потока в теле плотины у ее концов.

На рис. 9-7 показана карта гидроизогипс грунтового потока в существующей земляной плотине с экраном. Из рисунка видно, что в правобережном примыкании плотины грунтовые воды движутся параллельно оси плотины. Такая картина объясняется в основном наличием судоходного канала, создающего подпор грунтовых вод в правобережной части плотины. Однако и в левобережной ее части фильтрация в теле плотины не будет плоской: линии тока в плане не будут прямыми, перпендикулярными оси плотины. Резкое искажение фильтрации в теле земляных плотин вследствие влияния фильтрации в обход бере-

говых примыканий наблюдается в тех случаях, когда плотины имеют экраны, а сопряжение экрана с берегами не развито в виде завесы, продолжающейся внутрь берега, или в виде экрана, покрывающего часть берегового откоса верхнего бьефа.

В однородных земляных плотинах при отсутствии экрана или ядра влияние фильтрации в берегах вообще сказывается мало на фильтрации в теле плотины. Это влияние распространяется на небольшой длине у концов плотины.

Таким образом, повышение кривых депрессии в земляных плотинах может быть обусловлено различными причинами, которые могут быть выяснены в результате всесторонних и иногда длительных исследований. И лишь в результате правильного анализа этого явления можно установить дефекты плотины и вынести соответствующие решения о необходимых строительных и эксплуатационных мероприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов С. К., Бабушкин В. Д. Методы расчета притока воды к буровым скважинам. Госстройиздат, 1955.
2. Аверьянов С. Ф. Приближенная оценка роли фильтрации в зоне «капиллярной каймы». Доклады АН СССР, т. 69, № 3, 1949.
3. Адамович А. Н., Колтунов Д. В. Цементация оснований гидросооружений. «Энергия», 1964.
4. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Гидрометеоиздат, 1953.
5. Ансберг Е. А., Боровицкий В. П., Бутц Ш. Ф., Самарина В. С. Практикум по общей гидрогеологии. Изд-во ЛГУ, 1965.
6. Аравин В. И. К вопросу о фильтрации в анизотропных водопроницаемых грунтах. Труды Ленинградского индустриального ин-та, ОНТИ, вып. 2, № 9, 1937.
7. Аравин В. И. Фильтрация в анизотропно-водопроницаемом грунте. Труды Ленинградского индустриального ин-та, вып. 1, 1940.
8. Аравин В. И. Приток грунтовых вод к водосборным совершенным колодцам. Известия ВНИИГ, т. 46, 1951.
9. Аравин В. И. Расчеты и моделирование плановой фильтрации. Госэнергоиздат, 1963.
10. Аравин В. И. Основные направления фильтрационных исследований в СССР в области гидротехники. Известия ВНИИГ, т. 78, 1965.
11. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. Гостехтеориздат, 1953.
12. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. Госстройиздат, 1955.
13. Аравин В. И., Стрельцова Т. Д. Об исследовании плановой неустановившейся фильтрации на интеграторах. Известия ВНИИГ, т. 76, 1964.
14. Астапов С. В., Емельянов В. А., Шишков К. Н. Опыт применения радиоактивных изотопов кобальта и йода в мелиоративных исследованиях. «Гидротехника и мелиорация», 1958, № 2.
15. Бан А., Богомолова А. Ф., Максимов В. А., Николаевский В. Н., Оганджанянц В. Г., Рыжик В. М. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости. Гостоптехиздат, 1962.
16. Башкис К. Ю., Дабужинская К. Ю. Фильтрационные исследования гидросооружений Каунасской ГЭС. «Гидротехническое строительство», 1963, № 3.
17. Биндеман Н. Н. Уточнение определения расхода грунтового потока по скорости его движения. «Разведка и охрана недр», 1959, № 2.
18. Биндеман Н. Н. Определение гидрогеологических параметров по данным наблюдений за режимом грунтовых вод при паводках. Изд. ВОДГЕО. 1957.
19. Биянов Т. Ф. Опыт строительства гидроузла в условиях вечной мерзлоты. «Гидротехническое строительство», 1965, № 10.
20. Богомолов Г. В. Основы гидрогеологии. Госгеолиздат, 1955.

21. Богун-Добровольский А. И. Опыт эксплуатации Иркутской ГЭС. «Гидротехническое строительство», 1962, № 7.
22. Большие плотины СССР. Госэнергоиздат, 1962.
23. Борисов Ю. П. Определение дебита скважин при совместной работе нескольких рядов скважин. Труды Московского нефтяного института имени Губкина, вып. 2, Гостоптехиздат, 1951.
24. Бочевер Ф. М., Цюрупа П. В. Прогноз притока и снижения уровней подземных вод при осушении месторождений полезных ископаемых. «Разведка и охрана недр», 1958, № 5.
25. Бочевер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов. «Недра», 1965.
26. Бурлай И. Ф. Определение частной водопроницаемости горных пород. Изд. Киевского гос. ун-та имени Т. Г. Шевченко, 1954.
27. Васильев А. М. Основы современной методики и техники лабораторных определений физических свойств грунтов. Госстройиздат, 1953.
28. Васильев А. Ф. Кольматация грунтов в основании напорных гидросооружений. «Гидротехническое строительство», 1960, № 2.
29. Василевский В. Н. Комплекс гидродинамических исследований пластов и скважин с целью получения исходных данных для проектирования и осуществления их разработки. Труды Всесоюзного нефтегазового НИИ, вып. 33, 1961.
30. Вахитов Г. Г. Эффективные способы решения задач разработки неоднородных нефтеводоносных пластов. Гостоптехиздат, 1963.
31. Веригин Н. Н. О растворении и вымыве солей при фильтрации воды в грунтах. Научные доклады высшей школы, «Строительство», № 2, 1958.
32. Веригин Н. Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. Госстройиздат, 1962.
33. Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. Госстройиздат, 1952.
34. Вопросы гидрогеологических расчетов. «Мир», 1964.
35. Вощинин А. П. Лабораторные исследования и натурные наблюдения на Волжской ГЭС имени В. И. Ленина. Фильтрационные исследования. Труды Гидропроекта, сб. 5, 1961.
36. Вяземский О. В., Сдобников Д. В., Михалевич П. А. Об эффективности гибких противофильтрационных диафрагм земляных сооружений. Известия ВНИИГ, т. 46, 1951.
37. Вяземский О. В., Кузьмищев П. Ф., Михалевич П. А. Работа намывной подпорной дамбы в сложных гидрогеологических условиях. Известия ВНИИГ, т. 52, 1954; т. 54, 1955.
38. Вяземский О. В., Нумеров С. Н. О расчете водоотдачи в намывных сооружениях. Известия ВНИИГ, т. 52, 1954.
39. Вяземский О. В., Кузьмищев П. Ф., Михалевич П. А. Исследование работы бетонной плотины в осложненных геологических условиях. Известия ВНИИГ, т. 64, 1960.
40. Гельфер А. А. Причины и формы разрушения гидротехнических сооружений. ОНТИ, 1936.
41. Гершанович И. М., Макаридин Н. А. Метод измерения объемной скорости движения жидкости по скважине для решения ряда вопросов гидрогеологии. Геофизическая разведка, Гостоптехиздат, вып. 6, 1962.
42. Гинзбург М. Б. Определение противодавления в гравитационных плотинах на скальном основании. Госэнергоиздат, 1958.
43. Гинзбург М. Б. Натурные исследования крупных гидротехнических сооружений. «Энергия», 1964.
44. Гиринский Н. К. Определение коэффициента фильтрации по данным откачек при неустановившихся дебите и понижении. Госгеолиздат, 1950.
45. Гиршкан С. А., Мочалов И. П. Фильтрация из каналов и проницаемость грунтов. Известия ВНИИГ, т. 74, 1964.

46. Глазь А. А., Гозадинов Б. Ю. Опыт применения электрометрического и химического методов при определении действительных (средних) скоростей фильтрации в теле земляной плотины Мингечаурской ГЭС. Известия ВНИИГ, т. 77, 1965.

47. Горюнов С. И. К расчету допустимой интенсивности намыва безъядерных плотин. Известия ВНИИГ, т. 61, 1958.

48. Григорьев В. М. Определение коэффициента фильтрации верхнего слоя двухслойной среды по данным откачек. «Гидротехника и мелиорация», 1951, № 10.

49. Гринбаум И. И. Геофизические методы определения фильтрационных свойств горных пород. «Недра», 1965.

50. Гришин М. М. Гидротехнические сооружения, ч. 1. Госстройиздат, 1954.

51. Гришин М. М. О плотинах из крупнообломочных грунтов, Сборник трудов МИСИ. вып. 46, 1964.

52. Дворяшин В. И. Фильтрация гравитационных плотин на скальных основаниях. Госстройиздат, 1961.

53. Дмитриев Ф. Д. Крушения инженерных сооружений. Госстройиздат, 1953.

54. Добровольский К. И. Теоретические основания полевых методов исследования грунтов на водопроницаемость. Тифлис, 1932.

55. Дорохов М. М. Особенности работы гидротехнических сооружений ГЭС при суточном регулировании уровней бьефов. «Гидротехническое строительство», 1962, № 2.

56. Дюкло Ж. Диффузия в жидкостях. ГОНТИ, 1939.

57. Жернов И. Е. Расчеты захвата подземных вод. Изд-во АН УССР, 1954.

58. Задворный Г. М., Петровский М. Б. Результаты натурных наблюдений фильтрационного режима в основании бетонных сооружений Уч-Курганской ГЭС. Известия ВНИИГ, т. 75, 1964.

59. Задворный Г. М. Исследование состояния бетона водосливной плотины Горьковской ГЭС в натурных условиях. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып 19, 1965.

60. Задворный Г. М. Результаты натурных исследований противодавления и фильтрации в скальном основании плотины Усть-Каменогорской ГЭС. «Гидротехническое строительство», 1966, № 7.

61. Задворный Г. М. Кальницкий Э. С., Петровский М. Б. Результаты применения метода кратковременных откачек для оценки фильтрационных свойств скального основания Усть-Каменогорской ГЭС. Известия ВНИИГ, т. 80, 1966.

62. Запорожец В. М. Применение радиоактивных изотопов для контроля гидравлического разрыва пластов. В сб. «Применение радиоактивных изотопов и излучений в нефтяной промышленности», Гостоптехиздат, 1957.

63. Запорожниченко Э. В. О номенклатурном критерии СНиП 1962 г. для оценки просадочности и набухаемости грунтов. «Гидротехника и мелиорация», 1966, № 4.

64. Иванов А. Т. Определение подземной составляющей речного стока гидрохимическим способом. Труды лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР, т. 3, 1948.

65. Избаш С. В. Фильтрационные деформации грунта. Известия НИИГ, т. 10, 1933.

66. Инструкция по определению направления и скорости течения подземных вод И-27-53. Госэнергоиздат, 1953.

67. Инструкция по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений МЭС-10-57. Госэнергоиздат, 1957.

68. Инструкция по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. ВСН-02-65 ГПКЭиЭ СССР, «Энергия», 1965.

69. Истомина В. С. Фильтрационная устойчивость грунтов. Госстройиздат, 1957.

70. Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод. Госгеолиздат, 1943.

71. Каменский Г. Н., Гавич И. К., Мясникова Н. А., Семенова С. М., Гидродинамические основы прогноза режима грунтовых вод. Изд-во АН СССР, 1960.

72. Карпов А. А. и др. Применение радиоактивных изотопов в строительстве Сталинградской ГЭС. «Гидротехническое строительство», 1957, № 2.

73. Каткова С. А. О работе вертикального дренажа основания земляной плотины Цимлянского гидроузла. «Гидротехническое строительство», 1964, № 12.

74. Киракосов В. П. Исследование фильтрации в построенных водонапорных бетонных сооружениях. Госстройиздат, 1956.

75. Киселев П. А. Исследование балланса грунтовых вод по колебаниям их уровня. Изд-во АН БССР, 1961.

76. Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. Гостоптехиздат, 1962.

77. Колесникова Р. С. О величине коэффициента молекулярной диффузии по опытным данным о работе закрытых дрен Мугани (Джафархан). В сб. «Вопросы орошения», «Урожай», Киев, 1964.

78. Коль С. А. Определение скорости фильтрации подруслового потока. Труды Гидрологического института, вып. 8 (62), Гидрометеоиздат, 1948.

79. Коляда М. С. Опыт эксплуатаций дамб деривационного канала, насыпанных без уплотнения. «Гидротехническое строительство», 1949, № 12.

80. Коноплянцев А. А., Ковалевский В. С., Семенов С. М. Естественный режим подземных вод и его закономерности. Госгеолтехиздат, 1963.

81. Королев А. А. Понижение кривой депрессии в земляной плотине. «Гидротехническое строительство», 1961, № 2.

82. Костяков А. Н., Фаворин Н. Н., Аверьянов С. Ф. Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. Изд-во АН СССР, 1956.

83. Котульский В. В. Инъекционная завеса плотины Ортотокойского водохранилища. «Гидротехническое строительство», 1964, № 9.

84. Кузнецов А. М. О газовых явлениях в основании бетонных плотин. «Гидротехническое строительство», 1965, № 10.

85. Кузовлев Г. М. Анализ причин прорыва пионерной дамбы. «Гидротехническое строительство», 1964, № 2.

86. Ланге О. К. Основы гидрогеологии. Изд-во МГУ, 1950.

87. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. Физматгиз, 1959.

88. Лейбензон Л. С. Собрание трудов, т. 2. Изд-во АН СССР, 1953.

89. Ломизе Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах. Госэнергоиздат, 1951.

90. Лубочков Е. А. Разрушение земляной плотины ГЭС малой мощности. «Гидротехническое строительство», 1957, № 8.

91. Лубочков Е. А. Анализ фильтрационного режима и работы обратных фильтров сооружений Каховского гидроузла. Известия ВНИИГ, т. 73, 1963.

92. Лубочков Е. А. Графический и аналитический способы определения суффозионных свойств несвязных грунтов. Известия ВНИИГ, т. 78, 1965.

93. Лукьянов В. С. Вевиоровская М. А. Применение метода гидравлических аналогий к исследованиям фильтрации грунтовых вод. В сб. «Проблемы гидрогеологии», Госгеолтехиздат, 1960.

94. Лыкошин А. Г. Опыт определения водопроницаемости основания плотины по данным откачки из строительного котлована. «Гидротехническое строительство», 1957, № 7.

95. Малышев М. П. Оснащение гидротехнических сооружений контрольно-измерительной аппаратурой для наблюдений за фильтрацией и методика натурных исследований. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 29, «Энергия», 1966.

96. Маменко Г. К. Природные гидрогеологические условия и особенности водопонижения в котлованах Сталинградской ГЭС. Труды совещания по вопросам водопонижения в гидротехническом строительстве. Госстройиздат, 1959.

97. Матвеев Б. К. Определение направления и скорости потока подземных вод по одной скважине. «Разведка и охрана недр», 1958, № 12.

98. Матвеев Б. К. Геофизические методы изучения движения подземных вод. Госгеолтехиздат, 1963.

99. Мейнцер О. Е. Учение о грунтовых водах. ОНТИ, 1935.

100. Методическое руководство по гидрогеологической съемке. ВСЕГИНГЕО, Госгеолтехиздат, 1961.

101. Методическое руководство по изучению режима подземных вод. Госгеолтехиздат, 1954.

102. Методические указания по фильтрационным расчетам водопонизительных установок. Госэнергоиздат, 1962.

103. Мясникова Н. А. Прогноз подпора грунтовых вод. «Наука», 1964.

104. Насберг В. М. Определение коэффициента фильтрации неводонасыщенных грунтов методами наливов и нагнетаний в скважины и шурфы. Известия ТНИСГЭИ, т. 17, 1967.

105. Насберг В. М. Краткие итоги исследований гидротехнической лаборатории по фильтрации. Известия ТНИСГЭИ, т. 14 (48), 1962.

106. Николаевский В. Н. Определение характеристик фильтрационных потоков по данным исследований методом меченых атомов. В кн. «Новые методы исследований и приборы для гидравлических исследований», Изд-во АН СССР, 1961.

107. Николаевский В. Н. К построению нелинейной теории упругого режима фильтрации жидкости и газа. «Прикладная механика и техническая физика», 1961 № 4.

108. Ничипорович А. А. Оползень низового откоса никопольской дамбы в процессе ее строительства. «Гидротехническое строительство», 1956, № 9.

109. Носова О. Н. Организация натурных исследований фильтрации при помощи радиоактивных индикаторов. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 9, «Энергия», 1961.

110. Носова О. Н. К вопросу об определении скорости фильтрации по данным о движении индикаторов. Известия ВНИИГ, т. 68, 1961.

111. Носова О. Н. Расчет водоотдачи песчаных грунтов. Госэнергоиздат, 1962.

112. Носова О. Н. Исследование состояния сооружений Камской ГЭС. ВНИИГ, Аннотации законченных в 1964 г. н.-и. работ по гидротехнике, «Энергия», 1965.

113. Носова О. Н. Разработка методики исследований напорной фильтрации и химической суффозии при помощи радиоактивных изотопов. Аннотации н.-и. работ по гидротехнике, «Энергия», 1965.

114. Носова О. Н. Вопросы методики определения фильтрационных характеристик грунтов по данным натурных наблюдений. Известия ВНИИГ, т. 81, 1966.

115. Нумеров С. Н. Приближенный способ расчета напорной фильтрации в основании гидротехнических сооружений. Известия ВНИИГ, т. 50, 1953.

116. Нумеров С. Н. Об учете водопроницаемости шпунтовых рядов при расчете фильтрации в основании бетонных плотин. Инж. сборник Ин-та механики АН СССР, т. 23, 1956.

117. Нумеров С. Н. О применении метода ЭГДА при приближенном расчете нестационарных полей в сплошных средах. Научные доклады высшей школы, «Энергетика», 1958, № 1.

118. Огильви Н. А. Геофизические методы исследований, Изд-во МГУ, 1962.

119. Огильви Н. А. Графоаналитический метод расчета водопрони-

цаемости анизотропных горных пород, вмещающих напорный водоносный горизонт. Материалы по инженерной геологии, № 4, Металлургиздат, 1953.

120. Огильви Н. А. Определение параметров скорости распространения подпора в грунтовых водах путем анализа их режима. «Советская геология», сб. 56, 1956.

121. Олейник А. Я., Шестаков В. М. Приток воды к прерывистому дренажу, линейному ряду горизонтальных несовершенных трубчатых и ленточных дрен. «Прикладная механика», т. 2, вып. 1, 1966.

122. Орадовская А. Е. О методике определения засоленности горных пород. Труды лаборатории инженерной гидрогеологии, Госстройиздат, 1957.

123. Орнатский Н. В., Сергеев Е. М., Шехтман Ю. М. Исследование процесса кольматации песков. Изд-во МГУ, 1955.

124. Павлов А. П. Избранные сочинения, т. 2, М., 1951.

125. Павловский Н. Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения. Собрание сочинений, т. 2, Изд-во АН СССР, 1956.

126. Петрашень Р. Н. Чувствительность пьезометров бетонных гидротехнических сооружений. Труды Гидропроекта, сб. 8, 1963.

127. Петумахин Б. И. К вопросу об определении направления, скорости движения подземных вод и коэффициента фильтрации горных пород геофизическими методами. В кн. «Сборник научных трудов Казанского горно-металлургического ин-та», № 12, т. 14, Металлургиздат, 1956.

128. Плотников М. А. при участии Богомолова Г. В. и Каменского Г. Н. Классификация ресурсов подземных вод для целей водоснабжения и методика их подсчета. Госгеолиздат, 1941.

129. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. Гостехтеориздат, 1952.

130. Половко А. М. Основы теории надежности. «Наука», 1964.

131. Попов В. Н. Организация и производство наблюдений за режимом подземных вод (инструктивные указания). Госгеолтехиздат, 1955.

132. Попова Т. П. О расчете растворимости гипса в природных водах. «Разведка недр», 1951, № 6.

133. Приклонский В. А. Грунтоведение, ч. 1, 2, Госгеолтехиздат, 1955.

134. Проектирование и строительство больших плотин по материалам 5-го Международного конгресса по большим плотинам. Госэнергоиздат, 1958.

135. Противофильтрационные завесы плотин. Сб. ин-та ВОДГЕО, Госстройиздат, 1963.

136. Прохоров С. П. Требования к гидрогеологической изученности месторождений полезных ископаемых. Госгеолиздат, 1951.

137. Прочухан Д. П. Изменение гидрогеологических условий в нижнем бьефе Камской ГЭС в связи с наполнением водохранилища. Информ. сб., № 24, Ленгидропроект, 1962.

138. Растворение и выщелачивание. Госстройиздат, М., 1957.

139. Рельтов Б. Ф., Новицкая Н. А. Осмотические явления в связных грунтах при неравномерном их засолении. Известия ВНИИГ, т. 51, 1954; т. 53, 1955.

140. Ржаницын Б. А. Измерение скоростей фильтрации грунтовых вод с применением радиоактивных изотопов. В сб. «Материалы к совещанию по инженерно-геологическим особенностям строительства и эксплуатации плотин и водохранилищ в горно-складчатых областях на примере Грузии», т. 2, Изд-во ГПИ, Тбилиси, 1959.

141. Роде А. А. Почвенная влага. Изд-во АН СССР, 1952.

142. Родионов И. В., Барановский А. М. Некоторые вопросы изучения инженерно-геологических свойств горных пород при устройстве карьеров и глубоких выемок. «Разведка и охрана недр», 1957, № 3.

143. Розанов Н. С. Проектирование и исследование арочных плотин во Франции. «Энергия», 1966.

144. Романов А. В. Методы фильтрационных расчетов дренажных сооружений. В сб. «Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений», ВОДГЕО, сб. 3, Госстройиздат, 1959.

145. Ромм Е. С. Фильтрационные свойства трещиноватых пород. «Недра», 1966.

146. Ронжин И. С. и др. Об особенностях фильтрации в земляной плотине Цимлянского гидроузла. Бюллетень научно-техн. информации Гидропроекта, 1962, № 15.

147. Руководящие указания по наблюдениям за режимом подземных вод (РУ-6-52). Госэнергоиздат, 1952.

148. Самарина В. С. Гидрохимическое опробование подземных вод. Изд-во ЛГУ, 1958

149. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений. Госатомиздат, 1960.

150. Семенов А. С. Определение направления и скорости подземного потока при одной скважине. «Разведка недр», 1937, № 19.

151. Семенов М. П., Биндеман Н. Н., Гришин М. М. Методика инженерно-геологических исследований для гидротехнического строительства. ОНТИ, 1937.

152. Семенов М. П., Лыкошин А. Г. Процессы кольматации горных пород и их значение для гидротехнического строительства. Труды лаборатории инженерной гидрогеологии, ВОДГЕО, сб. 3, Госстройиздат, 1960.

153. Семенов М. П., Орадовская А. Е. и Лыкошин А. Г. Задачи и методы инженерно-геологических исследований скальных и полускальных горных пород при гидротехническом строительстве. Труды лаборатории инженерной гидрогеологии, Госстройиздат, 1957.

154. Семихатов А. Н. Гидрогеология. Сельхозгиз, 1954.

155. Сизов А. И. Изучение трещиноватости пород по стенкам буровых скважин. Информ. сб., № 24, Ленгидропроект, 1962.

156. Силин-Бекчурин А. И. Специальная гидрогеология. Госгеолиздат, 1951.

157. Силин-Бекчурин А. И. Динамика подземных вод. Изд-во МГУ, 1965.

158. Симонов Е. В. Определение статического уровня подземных вод в породах, обладающих малой водопроницаемостью. В кн. «Гидросиловые установки», ВИНИТИ, тема № 25, 1958.

159. Скабалланович И. А. Гидрогеологические расчеты. Углетехиздат, 1954.

160. Скиргелло О. Б. Определение коэффициента закарстованности по данным наблюдений за режимом подземных вод. «Разведка недр», 1949, № 5.

161. Справочное руководство гидрогеолога. «Недра», 1967.

162. Сушилин В. А. Телеизмерение потока в скважинах. Труды Всесоюзного нефтегазового НИИ, вып. 35, 1961.

163. Талобр Ж. Механика горных пород. Госгортехиздат, 1960.

164. Терлецкая М. Н. Деформация гипсоносного грунта при фильтрации. «Почвоведение», 1955, № 9.

165. Технические указания по установке контрольно-измерительных приборов в бетонные гидротехнические сооружения, производству отсчетов и первичной их обработке, проект, «Энергия», 1964.

166. Троянский С. В., Беляев Д. Д. Методика проектирования осушения на шахтах Подмосковного угольного бассейна. ОНТИ, 1938.

167. Троянский С. В., Белицкий А. С., Чекин А. И. Гидрогеология и осушение месторождений полезных ископаемых. Углетехиздат, 1956.

168. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 25, «Энергия», 1966.

169. Труды совещания по вопросам понижения уровня грунтовых вод. Стройиздат, 1966.

170. Угинчус А. А. Расчет фильтрации через земляные плотины. Госэнергоиздат, 1960.

171. Угинчус А. А. Исследования гидротехнических сооружений. Госэнергоиздат, 1939.
172. Угинчус А. А., Бомбчинский В. П. Контрольно-измерительная аппаратура гидротехнических сооружений. Госстройиздат, 1954.
173. Указания по применению радиоактивных индикаторов для исследования фильтрации в гидротехнических сооружениях. «Энергия», 1965.
174. Указания по методике натурных наблюдений химической суффозии в основаниях гидротехнических сооружений. «Энергия», 1968.
175. Улитин А. И. Наставление по наблюдениям за осадками и горизонтальными смещениями гидротехнических сооружений геодезическими методами. Госэнергоиздат, 1958.
176. Федин Н. Ф. Определение коэффициента водоотдачи по данным опытной откачки. Вестник АН Каз. ССР, № 2, 1953.
177. Халатян О. И. Опыт изучения фильтрационных потерь из водохранилища, расположенного в горной местности. «Гидротехническое строительство», 1964, № 10.
178. Хэммонд Р. Аварии зданий и сооружений. Госстройиздат, 1960.
179. Чарный И. А. Основы подземной гидравлики. Гостоптехиздат, 1956.
180. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика. Госстройтехиздат, 1963.
181. Чернов Б. С., Базлов М. И., Жуков А. К. Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. Гостоптехиздат, 1960.
182. Черномашенцев Г. М., К вопросу определения гидрогеологических параметров путем анализа режима грунтовых вод во времени, Научные записки Днепропетровского гос. ун-та, т. 75, 1961.
183. Черняк Г. Я. Диэлектрические методы исследования влажных грунтов. «Недра», 1964.
184. Чугаев Р. Р. Подземный контур гидротехнических сооружений, Госэнергоиздат, 1962.
185. Чугаева Е. А. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений с учетом водопроницаемости входящих в состав сооружений металлических шпунтовых рядов. Известия ВНИИГ, т. 48, 1952.
186. Чураев Н. В. Исследование режима грунтового потока в торфяной залежи методом измерения концентрации радиоактивного индикатора в колодцах. Труды Калининского торфяного ин-та, вып. 11, 1960.
187. Шанкин П. А. Исследование фильтрации в построенных гидротехнических сооружениях. Изд-во Министерства речного флота СССР, 1947.
188. Швидлер М. И. Фильтрационные течения в неоднородных средах. Гостоптехиздат, 1963.
189. Шержуков Б. С., Гамаюнов Н. И. Методика расчета гидрогеологических параметров водоносных пластов при опробовании их опытной скважиной. Известия вузов «Геология и разведка», № 5, 1953.
190. Шехтман Ю. М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий. Изд-во АН СССР, 1961.
191. Шмаков М. И., Немилов А. И. Высачивание на откос намывной плотины после ввода ее в эксплуатацию. «Гидротехническое строительство», 1965, № 2.
192. Шнейдер Д. Г. Опыт эксплуатации берегового дренажа в г. Березники. Труды совещания по вопросам водопонижения в гидротехническом строительстве, Госстройиздат, 1959.
193. Щелкачев В. Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. Гостоптехиздат, 1959.
194. Щелкачев В. Н. Упругий режим пластовых водонапорных систем. Гостоптехиздат, 1948.
195. Энциклопедия современной техники. Строительство, т. 1, «Советская энциклопедия», 1964.
196. Язвин Л. С., Боревский Б. В. Опыт определения расчетных гидрогеологических параметров по данным групповых откачек. «Разведка и охрана недр», 1963, № 4.

197. Яковлев В. П. Возможность промысловых определений коэффициентов сжимаемости, нефтенасыщенности и нефтеотдачи пласта. Разработка нефтяных месторождений и гидродинамики пласта, Труды ВНИИ. вып. 21, 1959.

198. Якубов Х. Конструкция пьезометров и устранение недостатков в их работе. Вопросы гидротехники, вып. 3, 1961, Изд-во АН Узб. ССР.

199. Ярцев Н. А. К определению коэффициента водоотдачи криворожских доломитов, Информ. сб., № 24, Ленгидропроект, 1962.

200. Arnold M. D., Conzaler H. J., Crewford P. R. Estimation of reservoir anisotropy from production data. Journ. of Petr. Techn., v. 17, № 8, 1962.

201. Bauman N. P. Theoretical and practical aspects of well recharge. Amer. Soc. of Civ. eng. Transact., vol. 128, pt. 1, 1963.

202. Blackwell R. J., Rayne J. R., Terry W. M. Factors influencing the efficiency of miscible displacement. Journ. of Petr. Techn, vol. 11, № 7, 1959.

203. Bouwer Herman, Rice R. C. Seepage meters in seepage and recharge studies. Journ. of Irrigation and Drainage Division, Proc. of the Amer. Soc. of Civil Eng., vol. 89, № IR 1, March, 1963.

204. Brown R. H. Selected procedure for analysing aquifer tests data. Journ. of the American Water Works Assotiation, vol. 45, № 8, p. 844—866, 1953.

205. Brutsaert W. On pore size distribution and relative permeabilites of porous mediums. JGR, vol. 68, № 8, 1963.

206. Chandra Satich., Detrmination of constants of an aquifer by tests pumping analysis to assess ground water yields. «Irrig. and Power», № 5, May, 1962.

207. Davidson J. M., Biggar J. W., Nielsen D. R. Gammaradiation attenuation for measuring bulk density and transient water flow in porous materials, JGR, vol. 68, № 16, 1963.

208. Engelund F. On the laminar and turbulent flows of ground water through homogene ous sand. «Transactions of the Danisch Acad. Techn. Sci.», № 3, 1953.

209. Ericksson E. A note on the disperssion of solt water boundary moving through saturated sand. «Trans. Amer. Geophys Union», vol. 39, № 5, 1958.

210. Faires R. A., Parks B. H. Radioisotope laboratory techniques. London, 1958.

211. Hall H. P. An investigation of steady flow toward a gravity well. «La Houille Blanche», Janvier-Fevrier, 1955.

212. Hantush M. S. Drainage wells in leany water table aquifers. «Transac. ASCE», vol. 128, pt. 1, 1963.

213. Hantush M. S. Hydraulics of gravity wells in sloping sands. «Transac. ASCE», vol. 128, pt. 1, 1963.

214. Horne R. A. and others. The effect of pressure on the electrical conductivity of sea water. JGR, vol. 68, № 7, 1963.

215. Hours R. Les traceurs radioactifs en hydrologie. «la Houille Blanche», № special A, 1955.

216. Iyer H. M., Punton V. W. A computer program for plotting wavefronts and rays from a point source in dispersive mediums, JGR, vol. 68, № 11, 1963.

217. Joungs E. G., Smiles D. E. The pumping of water from wells in unconfined aquifers. A note on the applicability of Theis' formula. JGR, vol. 68, N 20, 1963.

218. Kaufman W. J., Orlob G. T. An evaluation of groundwater tracers. "Transactions, Amer. Geophysical Union", vol. 37, N 3, 1956.

219. Kirkham Don. Exact theory of flow into partially penetrating well. Journ. of Geophys. Research, vol. 64, N 9, 1959.

220. Lamber J. M. and others. How to prepare and use radioactive soils, "Nucleonics", vol 12, N 2, Feb. 1954.

221. Lang S. M. Interpretation of boundary effects from pumping tests data. Journ. Amer. Water Works Assoc., vol. 52, N 3, 1960.

222. Mansur Charles J. Laboratory and in—situ permeability of sand. «Amer. Soc. Civ. Eng. Transac.», vol. 123, 1958.

223. Martin Pierre. La determination du coefficient de permeabilite des roches par les mesures dans les sondages. Marseille, 1959.

224. Newstesd G., Jeagers J. C. Study of underground water movement by measurements in drilt holes. «Engineer.», vol. 202, N 5243, p. 71—79, III, July 20, 1950.

225. Ogden H., Orchard R. J. Ground movements in North Staffordschire. Indian Journ. of Power and Vally Develop., vol. 10, N 1, 1960.

226. Patten E-ngene P., Behnett J., Gordon D. Methods of flow measurement in well bores. «Geol. Surv. Water-Supply Paper», № 1344-C, 1962.

227. Radioisotopes in Hydrology. Proc. of a Simposium Tokyo, 5—9 March, 1963, Vienna, 1963.

228. Schiek K. Über die Einsatz radioaktiver Isotope zur Lösung hydraulischer und hydrologischer Probleme in der Wasserwirtschaft. Wissenschaftliche Zeitschrift, Leipzig.

229. Sheard J. L., Woodward R. J., Gizienski S. F., Clevenger W. A. Earth and earth-rock dams. John Wiley and Sons, New-York, London, Sydney, 1963.

230. Sokol Daniel. Position and fluctuations of water level in wells perforated in more than one aquifer. JGR, vol. 68, N 4, 1963.

231. Spencer E. A., Tudhope J. S. A literature survey of the salt-dilution method of flow measurement. Journ. of the Inst. of Water Eng., vol. 12, N 2, 1957.

232. Stallman R. W. Numerical analysis of regional water levels to define aquifer hydrology. «Transac. Amer. Geophys. Union», vol. 37, N 4, 1956.

233. Terzaghi K., Leps Thomas M. Design and performance of Vermilion dam. «Amer. Soc. of Civ. Eng. Transac.», vol. 125, 1960.

234. Theis Ch. V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well, using ground—water storage. «Transac. Amer Geophys. Union», vol. 16, 1935.

235. Todd D. Ground water hydrology. New York, 1959.

236. Waldmeyer T. Rates of flow of undergroundwater and the choice of tracers to determine them. Journ. of Inst. of Water Engineers, vol. 12, N 6, 1958.

237. Zeller J. The significance of aquifer porosity in nonsteady seepage flow with free surface. Ninth convention—Belgrad, JAHR, p. 3, 1961.

238. Zaslavsky Dan, Kassiff Gabriel. Theoretical formulation of piping mechanism in cohesive soils. «Geotechnique», vol. 15, № 3, Sep., 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава первая **Общие сведения о натурных исследованиях фильтрации** 5

§ 1-1. Основные задачи натурных исследований фильтрации . . . —
§ 1-2. Связь натурных исследований фильтрации с исследованиями теоретически-экспериментальными 8

Глава вторая. **Основные сведения из теории фильтрации, используемые при натурных исследованиях** 11

§ 2-1. Основные положения . . . . . —
§ 2-2. Характеристика водопроницаемых грунтов 12
§ 2-3. Характеристика воды в грунте 14
§ 2-4. Законы сопротивления при фильтрации 15
§ 2-5. Общие сведения об определении фильтрационных характеристик грунтов 18
§ 2-6. Классификация грунтов по их фильтрационным свойствам 20
§ 2-7. Основные уравнения фильтрации . . . . . —
§ 2-8. Краткие сведения о теоретических методах расчета фильтрации 23
§ 2-9. Общие сведения о притоке грунтовых вод к одиночным скважинам 25
§ 2-10. Определение характеристик грунтовых потоков по натурным данным 27
§ 2-11. Эпюры напоров и давлений на флютбеты гидросооружений 29

Глава третья. **Определение форм грунтовых потоков в натуре** 32

§ 3-1. Основные цели определения форм грунтовых потоков . . . —
§ 3-2. Основные сведения о проектировании пьезометрических сетей 33
§ 3-3. Наблюдения за уровнями воды в пьезометрах и контроль их показаний 44
§ 3-4. Построение карт гидроизогипс и гидроизопьез по пьезометрическим уровням 46
§ 3-5. Некоторые вопросы анализа карт гидроизопьез и гидроизогипс 50
§ 3-6. Формы фильтрационных потоков в земляных плотинах . . 52

Глава четвертая. **Определение скоростей фильтрации в натурных условиях** 56

§ 4-1. Общие сведения о постановке исследований по изучению скоростей фильтрации . . . . . —
§ 4-2. Определение скоростей фильтрации по данным прямых измерений расходов и скоростей фильтрационных потоков . . 57
§ 4-3. Общие принципы использования метода индикаторов для определения скоростей фильтрации 60
§ 4-4. Основы расчета процесса перемещения индикаторов в пористой среде 62
§ 4-5. Определение скоростей фильтрации способом пусковых скважин 64

§ 4-6. Определение скоростных характеристик потока способом наблюдательных скважин 69
§ 4-7. Общие замечания об использовании индикаторных методов при натурных исследованиях фильтрации 73

Глава пятая. **Определение коэффициента фильтрации в натурных условиях** 76

§ 5-1. Задачи исследований и пути их решения . . . . . —
§ 5-2. Определение коэффициента фильтрации по откачкам и нагнетаниям 78
§ 5-3. Влияние граничных условий на расчет фильтрационных характеристик пласта 82
§ 5-4. Определение коэффициента фильтрации в случае неоднородной грунтовой толщи 84
§ 5-5. Определение коэффициента фильтрации по данным групповых откачек 88
§ 5-6. Применение метода ЭГДА для определения фильтрационных характеристик пластов 91
§ 5-7. Определение коэффициента фильтрации пласта по дебютам пьезометров 94
§ 5-8. Определение коэффициента фильтрации по нагнетаниям в неводонасыщенный грунт 98
§ 5-9. Сравнительная оценка практической применимости различных способов определения коэффициента фильтрации по опытам со скважинами 102

Глава шестая. **Определение коэффициентов уровнепроводности и пьезопроводности** 106

§ 6-1. Общие сведения о коэффициентах уровнепроводности и пьезопроводности . . . . . —
§ 6-2. Сущность понятий коэффициентов водоотдачи и недостатка насыщения 108
§ 6-3. Определение коэффициентов водоотдачи и недостатка насыщения по натурным данным 111
§ 6-4. Общие принципы выбора значений коэффициентов водотдачи в расчетах 115
§ 6-5. Определение фильтрационных параметров пластов по режимным наблюдениям 119
§6-6. Оценка величины коэффициентов пьезо- и уровнепроводности по показаниям одиночных пьезометров 122
§ 6-7. Определение коэффициентов пьезо- и уровнепроводности по результатам откачек 124
§ 6-8. Обработка результатов опытов по испытанию скважин при неустановившейся фильтрации 128
§ 6-9. Общие замечания по практическому использованию уравнений упругого режима 132

Глава седьмая. **Натурные исследования фильтрационных деформаций грунта** 135

§ 7-1. Общие сведения о фильтрационных деформациях грунта . —
§ 7-2. Основные способы исследований фильтрационных деформаций грунта 137
§ 7-3. Наблюдения за состоянием грунта 140
§ 7-4. Исследования механической суффозии 143
§ 7-5. Натурные исследования кольматации грунтов гидросооружений и их оснований 146
§ 7-6. Натурные исследования обратных фильтров дренажей . . . 148
§ 7-7. Исследования химической суффозии 152

§ 7-8. Методика отбора проб воды на химический анализ из пьезометров 156
§ 7-9. Особенности исследований фильтрационного режима при фильтрационных деформациях грунта 160

Глава восьмая. **Натурные исследования фильтрации на гидротехнических сооружениях** 164
§ 8-1. Общие замечания о методике натурных исследований фильтрации на гидротехнических сооружениях . . . . . —
§ 8-2. Натурные исследования фильтрации при проектировании сооружений 166
§ 8-3. Натурные исследования фильтрации в период производства работ 172
§ 8-4. Исследования фильтрации из водохранилищ 181
§ 8-5. Натурные исследования фильтрации под бетонными водоподпорными сооружениями 188
§ 8-6. Пример исследования состояния суффозионно-неустойчивых оснований плотин 193
§ 8-7. Анализ эпюр напоров по подземному контуру гидротехнических сооружений 199
§ 8-8. Исследования эффективности противофильтрационных завес 204
§ 8-9. Натурные исследования шпунтовых стенок 211
§ 8-10. Исследование фильтрации к дренажам 214
§ 8-11. Натурные исследования фильтрации из каналов 218

Глава девятая. **Натурные исследования фильтрации при прогнозе и анализе аварий гидротехнических сооружений** 226
§ 9-1. Общие сведения о надежности гидротехнических сооружений . . . . . —
§ 9-2. Роль фильтрации при авариях гидротехнических сооружений 227
§ 9-3. Главнейшие виды вредного действия фильтрации на гидротехнические сооружения 230
§ 9-4. Образование фильтрационных ходов в гидротехнических сооружениях и их основаниях 231
§ 9-5. Подъем кривых депрессии в земляных плотинах 236

Литература 244