МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ им. Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА (ВНИИГ)

ГРУЗИНСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ (ГрузНИИЭГС)

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ «ГИДРОПРОЕКТ» им. С. Я. ЖУКА СРЕДНЕАЗИАТСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ (САОГИДРОПРОЕКТ)

РЕКОМЕНДАЦИИ

по натурным наблюдениям и исследованиям фильтрации в подземных гидротехнических сооружениях

П 10—83
ВНИИГ

ЛЕНИНГРАД
1983

УДК 626/627 : 624.1 (047)

В работе даны рекомендации по составлению проектов закладки контрольно-измерительной аппаратуры для натурных наблюдений и исследований фильтрации, в том числе исследований эффективности противофильтрационной цементации и разгрузочных дренажей обделок вокруг подземных гидротехнических сооружений глубокого заложения с учетом инженерно-геологических условий. Описаны приборы и способы для наблюдений и исследований за фильтрацией в периоды изысканий, строительства и эксплуатации названных подземных сооружений.

Рекомендации предназначены для инженерно-технических и научных работников, работающих в области контроля и натурных исследований подземных гидросооружений глубокого заложения, подверженных значительным давлениям подземных вод.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева (ВНИИГ), 1983.

ВВЕДЕНИЕ

Масштабы строительства подземных гидротехнических сооружений в Советском Союзе постоянно возрастают. Кроме гидроэлектростанций в ближайшие годы начнется строительство крупных гидроаккумулирующих электростанций, в состав которых войдут подземные сооружения глубокого заложения. К настоящему времени в Советском Союзе эксплуатируется не менее 300 км напорных и безнапорных гидротехнических туннелей и 11 подземных и полуподземных зданий ГЭС.

Согласно основным направлениям развития гидроэнергетики в XI — XII пятилетках предстоит завершить строительство подземных комплексов Рогунской, Миатлинской, Зеленчукской, Ирганайской, Зарамагской, Байпазинской, Верхне-Терибердской, Колымской, Спандарянской, Ташкумырской и других ГЭС с общей протяженностью выработок около 190 км.

При строительстве и эксплуатации подземных сооружений, как правило, приходится иметь дело с подземными водами, являющимися иногда основной нагрузкой на сооружение, причем при строительстве подземных гидротехнических сооружений приходится дополнительно учитывать влияние создаваемых водохранилищ и деривационных туннелей на изменение естественного режима подземных вод. Поэтому при проектировании подземных сооружений одной из основных проблем является правильный учет воздействия подземных вод и разработка мероприятий по снижению этого воздействия с целью облегчения конструкций обделок, ускорения строительства и повышения долговечности сооружений. Разработка таких мероприятий при правильном подходе должна начинаться уже на стадии изысканий. Недоучет давления подземных вод может привести к нежелательным последствиям, особенно когда туннель или шахта имеют стальную облицовку.

Вопросы теоретической оценки количественных показателей надежности гидротехнических сооружений и особенно долговечности, как известно, пока не имеют удовлетворительного решения. Поэтому натурные наблюдения рассматриваются в настоящее время как основное средство обеспечения безопасности эксплуатации сооружений [1], а натурные наблюдения и исследования фильтрации относятся к числу важнейших.

Актуальность проблемы натурных наблюдений в гидротехнических туннелях возросла в связи с тем, что за последнее время участились случаи повреждений обделок, выразившиеся в нарушении их монолитности вследствие образования довольно значительных трещин и в больших утечках воды из туннелей, ведущих к прекращению эксплуатации ГЭС, к подвижкам склонов и бортов ущелий, поднятию уровня подземных вод [2].

Уникальность подземных сооружений мощных ГЭС, залегающих на больших глубинах под уровнем подземных вод, сложность инженерно-геологических и гидрогеологических условий требует постановки и решения ряда задач, ранее не возникавших при проектировании, строительстве и эксплуатации отечественных ГЭС, что, в свою очередь, заставляет создавать и разрабатывать новые методы и средства наблюдений за сооружениями, в том числе за фильтрацией.

Например, нормативным документом [3] в напорных туннелях разрешено проектировать обделки с лимитированным раскрытием трещин. Однако это смелое прогрессивное решение пока недостаточно подкреплено натурными исследованиями; измерения раскрытия трещин в напорных туннелях под нагрузкой не проводятся вообще.

Развитие натурных фильтрационных наблюдений и исследований в требуемых объемах и постановка их на надлежащем уровне тормозятся главным образом:

сложностью фильтрационных процессов, особенно в трещиноватых скальных массивах, в которых в основном строятся подземные (и особенно, высоконапорные) гидротехнические сооружения;

сложностью и трудоемкостью натурных наблюдений и исследований за фильтрацией;

недостаточностью внимания к этому важнейшему вопросу со стороны организаций, осуществляющих изыскания, проектирование, строительство и эксплуатацию гидротехнических сооружений;

отсутствием единых нормативов, руководств и рекомендаций по организации и проведению комплекса контрольно-режимных наблюдений на строящихся и эксплуатируемых сооружениях и отсутствием или недостаточностью специального контрольно-измерительного оборудования.

Известно, что натурные наблюдения и исследования являются наиболее объективным критерием оценки проектных решений, технологии возведения и качества построения сооружений или их отдельных элементов. Такие наблюдения и исследования, в частности, за фильтрацией в подземных сооружениях позволяют также уточнить существующие методы расчетов, накопить информацию, которая в ряде случаев не может быть получена в лабораторных условиях на моделях.

Систематические натурные наблюдения, кроме того, дают возможность вести непрерывный контроль за надежностью работы дренажных и противофильтрационных устройств, обеспечивающих безопасность подземных сооружений, производить оценку их состояния, своевременно назначать сроки проведения ремонтно-восстановительных работ и проверять их эффективность.

В последнее десятилетие в нашей стране существенно повышено внимание к обеспечению надежности гидротехнических сооружений. Важную роль при этом играет постепенное внедрение в практику эксплуатационного контроля показателей надежного состояния — критериев безопасности, с которыми могут сравниваться фактические показатели КИА.

Для обеспечения надежной эксплуатации сооружений необходимо создать, в свою очередь, надежную методику контроля за фильтрацией [4, 5].

Настоящие Рекомендации составлены в развитие действующих нормативных документов, в частности, по натурным наблюдениям и исследованиям, в соответствии с планом выпуска нормативных документов Лабораторией фильтрационных исследований ВНИИГа им. Б. Е. Веденеева.

В Рекомендациях приведены основные сведения, которыми следует руководствоваться при натурных наблюдениях и исследованиях фильтрации в подземных гидротехнических сооружениях во время изысканий, строительства и эксплуатации этих сооружений, приведены новые способы и устройства для наблюдений за фильтрацией; все эти сведения должны облегчить работу по составлению и осуществлению проекта названных фильтрационных исследований на современном уровне.

При составлении Рекомендаций использованы нормативно-методические указания, руководства, рекомендации, пособия, монографии, статьи и новейшие разработки НИСа Гидропроекта по фильтрационной контрольно-измерительной аппаратуре (КИА) для подземных сооружений Рогунской и Нурекской ГЭС; использованы разработки ГрузНИИЭГСа, Средазгидропроекта, а также предложенные авторами настоящих Рекомендаций некоторые способы и устройства для натурных наблюдений и исследований фильтрации в опытных камерах в скальных массивах и действующих подземных гидротехнических сооружениях.

Учитывая, что такие Рекомендации составлены впервые, они не могут претендовать на полноту освещения поставленной проблемы. Различные вопросы, рассматриваемые в Рекомендациях, освещаются не с одинаковой детальностью. По мере накопления соответствующих разработок и экспериментальных данных эти рекомендации будут дополняться и уточняться.

Рекомендации предназначены для специалистов, работающих в области изысканий, исследований, проектирования, строительства и эксплуатации подземных гидротехнических сооруже-

ний и разработаны Лабораторией фильтрационных исследований ВНИИГа им. Б. Е. Веденеева (руководитель лаборатории — канд. техн. наук В. Н. Жиленков), Лабораторией фильтрационных исследований ГрузНИИЭГСа (руководитель лаборатории — канд. техн. наук В. М. Насберг) и Сектором туннелей Средазгидропроекта (начальник сектора — канд. техн. наук В. Ф. Илюшин).

По проекту Рекомендаций были получены отзывы ВНИИ ВОДГЕО, НИИ оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова, Армгидропроекта, Ленгидропроекта, Средазгидропроекта, Тбилгидропроекта, НИСа Гидропроекта, ГрузНИИЭГСа.

Замечания по Рекомендациям следует направлять по адресу: 195220, Ленинград, Гжатская ул., 21, ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и 380071, Тбилиси, ул. Ленина, 70, ГрузНИИЭГС.

Министерство энергетики и электрификации СССР	Рекомендации по натурным наблюдениям и исследованиям фильтрации в подземных гидротехнических сооружениях	П 10—83 ВНИИГ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

1.1. Настоящие Рекомендации являются практическим пособием по натурным наблюдениям и исследованиям фильтрации в подземных гидротехнических сооружениях, проводимым в периоды изысканий, строительства и эксплуатации, а также при проектировании упомянутых сооружений.

Рекомендации распространяются и на безнапорные не гидротехнические подземные сооружения, входящие в состав гидроузлов (транспортные, грузовые, вентиляционные туннели и шахты и др.).

Примечание. В период изысканий исследования фильтрации в подземных гидротехнических сооружениях проводятся также в соответствии с [6].

1.2. Рекомендации составлены с учетом требований нормативных документов, предъявляемых к оснащению гидротехнических сооружений и их оснований контрольно-измерительной аппаратурой (КИА), и по натурным наблюдениям и исследованиям [7, 8, 3, 9].

1.3. В Рекомендациях приведены общие положения по натурным наблюдениям и исследованиям фильтрации в подземных гидротехнических сооружениях, даны общие понятия и необходимые рекомендации по наблюдению и исследованию силового воздействия фильтрационного потока на сооружения и вмещающий массив горных пород, притока подземных вод в сооружения, трещинообразования и утечек воды из сооружений; даны примеры оснащения подземных сооружений фильтрационной

Внесены Всесоюзным ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательским институтом гидротехники имени Б. Е. Веденеева	Утверждены ВНИИГом имени Б. Е. Веденеева Решением № 10 от 7.02 1983 г и согласованы с Главниипроектом Минэнерго СССР	Срок введения IV квартал 1983 г.

КИА; приведены апробированные и перспективные способы и средства натурных наблюдений за фильтрацией.

1.4. Основными задачами Рекомендаций являются снижение стоимости строительства и повышение эксплуатационной надежности подземных сооружений за счет правильного учета воздействия подземных вод и применения наиболее рациональных решений, используемых в проектах, а также улучшение условий труда строителей и эксплуатационного персонала подземных сооружений: зданий ГЭС и ГАЭС, помещений трансформаторов, подземных механизмов затворов и других «сухих» помещений.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЛЬТРАЦИИ

1.5. В основу гидромеханического расчета фильтрации в подземных сооружениях положен статистический метод, потому что форма и размеры частиц грунта, а также трещин в скальных массивах, настолько незакономерны, что о фильтрационных свойствах водопроницаемых пород можно судить лишь по осредненным характеристикам. В то же время 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 определяют, 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 равна действительному расходу воды, протекающей через данную площадку, поделенному на площадь сечения всех водопроводящих пор или трещин на площадке.

В практике натурных исследований могут встретиться случаи, когда движение воды происходит по очень крупным трещинам или карстам, имеющим индивидуальный характер, и элементы потока в этих образованиях следует определять гидравлическими способами.

В этих условиях необходима постановка и проведение дополнительных специальных исследований с целью выявления в фильтрационном потоке наличия участков сосредоточенной фильтрации.

Различие в характере движения воды в фильтрующей среде при относительно равномерной фильтрации и фильтрации сосредоточенной, как правило, должно сказываться на ее физических и химических характеристиках. В связи с этим можно

использовать различные методы наблюдений, химический анализ состава воды, гидробиологический и бактериологический анализы, различные физические анализы, радиационный анализ, изучение температурных и электрических полей и др. При отсутствии детектируемых различий в составе воды потока, определяемых условиями ее движения, могут быть использованы различные способы искусственной индикации.

1.6. К натурным наблюдениям за фильтрацией в гидротехнических сооружениях следует относиться как к самой важной и ответственной части контроля за состоянием данного сооружения, потому что вследствие скрытого характера фильтрации ее отрицательное воздействие удается распознать не сразу. Вместе с тем при разработке методики наблюдений приходится также учитывать совершенно особые и заранее неясные в деталях обстоятельства фильтрации, которые обусловлены неизбежной изменчивостью геологической структуры вмещающего массива горных пород. В подземных сооружениях, кроме того, необходимо учитывать изменение проницаемости тонкотрещиноватых пород под действием порового давления и изменения напряженного состояния массива, вызванного строительными и эксплуатационными факторами.

При организации натурных наблюдений в сооружениях, расположенных вблизи от плотины, большое значение придается наблюдениям в период первого наполнения водохранилища, причем специальное внимание должно уделяться изучению общих закономерностей изменения наблюдаемых параметров, и прежде всего пьезометрических напоров и расходов.

Поэтому невозможно создать единые положения по проведению натурных наблюдений за фильтрацией в подземных сооружениях.

Подход к выбору методов натурных наблюдений за фильтрацией в зависимости от конкретных гидрогеологических условий и компоновочно-конструктивных особенностей сооружения представляет сложную задачу для специалистов, занимающихся исследованиями и проектированием подземных сооружений.

1.7. Наступление аварийной ситуации в период длительной эксплуатации сооружения чаще всего бывает связано с локальным нарушением фильтрационной прочности и устойчивости фильтрующей среды. При этом в период, предшествующий аварии (или аварийной ситуации), развитие местного дефекта сравнительно слабо сказывается на контролируемых параметрах фильтрационного режима.

Поэтому независимо от общей тенденции к понижению вероятности аварий гидросооружений после периода их начальной эксплуатации нет оснований для сокращения объема фильтрационных наблюдений [10].

ВОЗДЕЙСТВИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОД НА ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ И ВМЕЩАЮЩИЙ МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД

1.8. Воздействие фильтрационных вод на подземные сооружения и вмещающий массив может проявляться в виде силового (механического) воздействия на массив породы и обделку сооружения при установившемся и неустановившемся режимах фильтрации, физико-химического воздействия на породу и материал конструкции, биологического воздействия на некоторые материалы конструкций, притока воды к сооружениям, трещинообразования и утечки воды из сооружения, изменения свойств горных пород и массивов.

1.9. Силовое воздействие фильтрационного потока на скелет грунта (породу) порождается возникновением фильтрационных и взвешивающих сил, приложенных со стороны потока к скелету грунта. Эти силы являются массовыми (объемными). Они могут обусловить возникновение суффозии и кольматажа, местного фильтрационного выпора, а иногда даже обрушение больших масс породы из стен и кровли выработки. Следует отметить, что из всех нагрузок, действующих на напорные и безнапорные подземные сооружения, наименее изучено давление фильтрационных вод, которое в некоторых случаях оказывается главнейшей нагрузкой. Например, некоторые туннели Нурекской ГЭС заглублены под депрессионную поверхность подземных вод до 200 м, а Рогунской — до 350 м. Механическое действие воды является мощным, и в то же время трудно поддающимся прогнозированию. Фильтрационные (гидродинамические) силы, действующие в теле бетонной обделки сооружения в большинстве случаев условно принимаются как статические, приложенные нормально к поверхности контакта порода — бетон.

Особо важное значение силовое действие подземных вод приобретает при наличии в обделках стальных облицовок. Нередко скальный массив, окружающий напорный туннель со стальной облицовкой, способен воспринимать большую часть нагрузки от внутреннего давления воды, что позволяет выполнить облицовку достаточно тонкой даже при значительных диаметрах туннелей и напорах в них. В этих случаях определяющим становится расчет облицовки на внешнее давление воды, при значительной величине которого может появиться необходимость в увеличении толщины металлической оболочки или установке колец жесткости.

Недоучет давления подземных вод может привести к разрушению стальной облицовки при опорожнении водовода. Так, например, в наклонной напорной шахте ХрамГЭС-2 диаметром 3,3 м, имеющей на длине 280 м стальную облицовку, при ее опорожнении произошло повреждение облицовки от давления подземных вод. Зарубежный опыт эксплуатации имеет много при-

меров аварий, происшедших из-за недооценки давления подземных вод.

1.10. Физико-химическое воздействие подземных вод на бетон и металл обделок приводит к их разрушению под действием агрессивных агентов или к уплотнению бетона, вызванному заполнителем пор и трещин, отложением частиц грунта и нерастворимых солей, набуханием [11].

При этом следует подчеркнуть, что особенно опасны по своему воздействию на бетонные и железобетонные обделки туннелей сульфатные подземные воды. Известны случаи, когда гидротехнические туннели, построенные в породах, содержащих гипсы и ангидриты, и закрепленные обделками из бетона на портландцементе, совершенно разрушались подземными водами через 1,5 — 2 года эксплуатации.

1.11. Биологическое воздействие обусловливается микроорганизмами и приводит к гниению деревянных конструкций, истачиванию их живыми организмами, обрастанию растениями поверхностей стали и бетона; иногда микроорганизмы разрушают сталь и бетон.

1.12. Водоприток к сооружениям необходимо оценивать как в период строительства, так и эксплуатации.

Известны случаи, когда из-за большого притока воды в забой приходилось менять трассу туннеля (ХрамГЭС-2, туннель Арпа — Севан и др.) или применять специальные способы проходки с опережающей цементацией или замораживанием породы.

В период эксплуатации большой приток подземных вод к сооружениям может потребовать устройство специальных водосбросных коллекторов (штолен, шахт), дренирования стен и потолков помещений, установки насосов и т. д. При этом необходимо иметь в виду, что водоотводные трубы малого диаметра могут быстро зарастать солями (продуктами выщелачивания из породы или цемента из обделки).

В подземных помещениях с электрическим оборудованием фильтрационная вода сильно осложняет условия эксплуатации оборудования (например, помещение подъемных механизмов строительного туннеля III яруса Нурекской ГЭС).

1.13. Трещинообразование и утечки воды из сооружений (туннелей, шахт, разветвлений и др.) могут привести к недовыработке электроэнергии, снижению долговечности обделки сооружения и к развитию нежелательных процессов в массиве горных пород.

1.14. Изменение свойств горных пород и массивов происходит под действием физического или химического изменения породы на контакте с водой.

Поровая вода в твердом веществе снижает прочность породы и повышает в несколько раз ее ползучесть, а следовательно, и деформативность. Снижение прочности пород, в свою оче-

редь, усиливает трещинное деформирование их, которое увеличивает фильтрацию.

Поровая вода в материале, заполняющем трещины, размягчает породу, повышает ее пластичность и способствует ее набуханию.

Собственно трещинная вода, содержащаяся в открытой полости трещины, является свободной водой, которая при возникновении разности напоров циркулирует по трещинам. Эта вода снижает силу трения вдоль стенок трещин; кроме того, эта сила трения снижается за счет противодавления воды.

Вымывая и выщелачивая породы, пропитывая их, подземные воды могут способствовать возрастанию горного давления. В трещиноватых породах подземные воды могут вызывать скольжение одних пластов по другим, причем масштабы последствий этого явления зависят от интенсивности притока воды к выработке. В практике строительства гидротехнических сооружений за рубежом известны неоднократные случаи разрушения туннелей, сооружаемых в склонах горных массивов. Нередко причиной этих аварий служило смачивание водой, просачивающейся в горный массив из туннеля.

Под действием увлажнения сухих глинистых пород происходит их набухание, приводящее к увеличению горного давления.

СОСТАВ И СРЕДСТВА НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ФИЛЬТРАЦИЕЙ

1.15. Согласно нормативным документам [3, 7, 8, 9] в проектах основных гидротехнических туннелей I, II и III классов должна предусматриваться установка КИА для проведения натурных наблюдений за работой сооружения как в процессе строительства, так и в период его эксплуатации, для оценки состояния обделки туннеля и окружающей породы и фильтрационного режима в подземном сооружении и в массиве горных пород на участке расположения сооружения. Наблюдения должны быть организованы так, чтобы измерения, выполняемые с помощью различной КИА, могли взаимно дополнять друг друга.

Основными современными средствами инструментального контроля являются измерительные преобразователи, с помощью которых осуществляют дистанционные измерения физических величин, характеризующих состояние и работу сооружений [12].

Основной целью инструментального контроля подземных сооружений является диагностика их фактического состояния, на основе которой возможно прогнозировать возникновение аварийных ситуаций. Накопление и анализ данных инструментального контроля позволяет совершенствовать проекты новых объектов и нормативные документы. Наряду с этим в последнее время возрастает необходимость использования данных инструментальных наблюдений для осуществления контроля и управления качеством строительно-монтажных работ.

Наблюдения, проводимые за фильтрацией в подземных сооружениях, подразделяются на контрольные наблюдения и специальные исследования.

1.16. Контрольные наблюдения проводятся с целью текущего строительного или эксплуатационного контроля за фильтрационными процессами и состоянием сооружения, связанными с фильтрацией подземных вод. К ним относятся наблюдения за следующими параметрами:

положением депрессионной поверхности фильтрационного потока, изменением гидрологического режима участка;

напорами подземных вод на контакте обделок подземных сооружений с вмещающей породой, вблизи от этого контакта в пределах зоны противофильтрационной (укрепительной) цементации породы;

давлениями подземных вод на обделку (для оценки величины коэффициента площади передачи давления α_2);

раскрытием трещин в породе и обделке и расходом воды, фильтрующейся из них и сквозь тело бетонной обделки в местах ее увлажнения, капежа, струйных выходов воды;

суммарными фильтрационными расходами, определяемыми мерными водосливами и другими способами;

эффективностью работы противофильтрационных и дренажных устройств, деформационных швов, заделок трещин;

появлением и интенсивностью механической и химической суффозии бетона подземных сооружений и вмещающих их пород (количеством и гранулометрическим составом твердых частиц, выносимых фильтрационным потоком из породы, фильтров или зоны цементации; состоянием натеков извести, выщелачиваемой из бетонной обделки; состоянием обнаженных поверхностей породы или дренажных полостей);

температурным и гидрохимическим режимом фильтрационного потока.

Наиболее простой формой контрольных наблюдений являются визуальные осмотры сооружений;

текущие осмотры сухих подземных сооружений (машинные залы, помещения трансформаторов, вспомогательные помещения, грузовые и транспортные туннели и т. п.);

специальные обследования, проводимые при резком изменении напора воды в напорных сооружениях, при возникновении серьезных деформаций обделок, после землетрясений.

Основным видом контрольных наблюдений являются стационарные наблюдения, организуемые для получения данных о происходящих процессах в окружающей сооружение породе, подземной воде, в конструкциях и внутри сооружений. Эти наблюдения проводятся как визуально, так и с помощью контрольно-измерительной аппаратуры.

Объем контрольных фильтрационных наблюдений определяется типом сооружения, степенью его ответственности (характе-

ризуемой классом сооружения) и сложностью инженерно-геологических и гидрогеологических условий массива горных пород, вмещающего сооружение.

1.17. Специальные исследования проводятся с целью выбора оптимальных параметров дренажных и противофильтрационных устройств, а также способов и устройств для определения трещинообразования в обделках, утечек воды из туннелей.

К специальным исследованиям относятся изучение физико-химических процессов в массиве горных пород и в обделке (суффозионной устойчивости заполнителя трещин, слабых прослойков, зон дробления), уточнение параметров водопроницаемости (коэффициентов фильтрации, коэффициентов водоотдачи, недостатка насыщения) породного массива, противофильтрационных элементов и обделок сооружений, оценка степени фильтрационной изотропности и однородности породы, вмещающей сооружения.

Специальные исследования, например, могут включать циклы температурных наблюдений и опыты по определению скоростных характеристик фильтрационного потока с помощью солевых индикаторов. Для уточнения расчетных параметров фильтрационного потока рекомендуется проводить опыты методом ЭГДА.

Проведение специальных исследований практикуют также в тех случаях, когда в процессе эксплуатации по каким-либо причинам выявляется недостаточность существующей системы регулярных наблюдений для решения возникающих инженерных задач. Во время специальных исследований фильтрации наблюдения выполняют по расширенной программе, предусматривающей возможность получения дополнительной информации об исследуемом объекте.

При выполнении таких специальных исследований следует стремиться к тому, чтобы направление моделируемого фильтрационного потока совпадало с тем, которое будет иметь место в процессе эксплуатации построенного сооружения.

Постановка специальных натурных фильтрационных исследований в каждом отдельном случае должна быть обоснована особой программой. Если для проведения специальных исследований устанавливаются приборы и другие устройства, необходимо рассматривать возможности их использования и для текущего строительного или эксплуатационного контроля.

В некоторых случаях между натурными наблюдениями и исследованиями различие практически отсутствует, и эти термины отражают лишь условное разграничение.

Объем специальных натурных исследований определяется актуальностью проблемы и сложностью разрешения вопросов, указанных в программе.

1.18. Для качественного и своевременного осуществления натурных наблюдений и исследований, для правильного понима-

ния явлений и их объективной оценки и прогноза их изменения во времени, натурные наблюдения должны проводиться с учетом разнообразия инженерно-геологических и гидрогеологических условий, а также видов подземных сооружений и их режима работы; задачи натурных исследований в каждом отдельном случае должны иметь свое направление, зависящее от поставленных целей, местных условий, типа сооружения, его значимости и др.; соответственно в каждом отдельном случае должна назначаться программа исследований, намечаться состав и методика исследований.

1.19. Для облегчения понимания, расшифровки, взаимной увязки и сопоставления результатов наблюдений за фильтрацией, наблюдения должны проводиться в следующие периоды: до проходки подземного сооружения; в период проходки выработки и возведения обделки; в период пуска и нормальной эксплуатации особенно при наполнении и сработке водохранилища; после землетрясения при активных тектонических подвижках вмещающего массива пород и после других чрезвычайных явлений.

1.20. В результате проведения натурных наблюдений дается оценка надежности и безопасности сооружения или отдельной его части на основании местных инструкций.

По результатам натурных наблюдений за фильтрацией надлежит вносить уточнения и изменения в инструкцию по эксплуатации и способам контроля работы, ремонта и восстановления дренажей и зоны противофильтрационной цементации, а также вносить изменения в соответствующие нормативные документы

1.21. С целью изучения условий фильтрации на наблюдаемом объекте целесообразно строить гидродинамические сетки фильтрации, имеющие в общем случае пространственный характер. При построении таких сеток должны учитываться особенности проницаемости пород, специфика работы дренажных и противофильтрационных устройств и т. п.

ПРОГРАММА НАБЛЮДЕНИЙ

1.22. Программа натурных наблюдений и исследований фильтрации в подземных гидротехнических сооружениях должна отображать практическую и теоретическую целесообразность намечаемых исследований и возможность их технического и производственного осуществления.

Она должна обеспечить эффективность всего комплекса работ по натурным исследованиям фильтрации, оперативность и своевременность обработки всей информации, получаемой от датчиков, и правильность интерпретации результатов такой обработки.

Программа должна отличаться гибкостью, позволять вносить необходимые изменения на различных этапах исследова-

ний. Программа исследований составляется проектной или научно-исследовательской организацией на стадии проекта.

1.23. В программе должны быть отражены следующие вопросы:

обоснование постановки натурных наблюдений;

цели и задачи предполагаемых наблюдений;

объекты наблюдения (массив горных пород, сооружение или его элементы);

состав наблюдений;

методика наблюдений; в ряде случаев для решения конкретных вопросов она может быть разработана заново;

аппаратура для проведения наблюдений;

предельные значения подлежащих контролю параметров, определяющих допустимое или недопустимое состояние контролируемого объекта;

сопоставительные теоретические расчеты и модельные исследования; эти работы следует выполнять в основном до проведения натурных исследований, чтобы полнее учитывать все действительные инженерно-геологические и гидрогеологические условия, а также условия возведения и работы сооружения;

ориентировочная стоимость предполагаемых наблюдений;

сроки начала и окончания работ, периодичность наблюдений, основные исполнители и доля их участия, а также ожидаемые результаты.

1.24. На основании утвержденной программы натурных наблюдений составляют проект размещения фильтрационной КИА в подземном сооружении и во вмещающем его массиве горных пород.

Проект размещения КИА составляют с учетом соответствующих нормативных документов, рекомендаций, методических указаний, пособий, разработанных ВНИИГом им. Б. Е. Веденеева.

Выбор конструкции и назначение количества КИА, а также ее размещение должны производиться в зависимости от класса туннеля, его конструкции, геологических и гидрологических условий, а также способов производства работ.

Состав КИА и ее размещение должны позволять устанавливать характер пространственной фильтрации (с учетом фильтрационной КИА по другим соседним сооружениям, например, плотины и ее основания), чтобы можно было не только контролировать работу подземного сооружения, но и сопоставлять результаты натурных наблюдений с модельными испытаниями и расчетами.

1.25. Применяемая КИА и методы наблюдений и исследований должны давать возможность быстро устанавливать воздействие того или иного фактора на поведение сооружения или его элементов. С этой целью целесообразно применение автоматически показывающей, а иногда и сигнализирующей (свет, звук)

аппаратуры, кабели которой выведены на пульты. Желательно получение такой информации, которая дает возможность прямой оценки состояния контролируемого объекта путем сравнения наблюдаемых значений контролируемых параметров с установленными заранее их предельными значениями.

При большом количестве приборов следует предусматривать централизацию и автоматизацию КИА при помощи автоматической измерительной системы (АИС) с выходом на ЭВМ, которую необходимо ввести в эксплуатацию с момента установки первых измерительных приборов. ЭВМ должна сопоставлять данные натурных наблюдений с критическими параметрами и сообщать на центральный пульт о возможных критических состояниях сооружений или их элементов.

Примечание. В приложении *1* приведены краткие сведения о приборах для натурных фильтрационных исследований, применяемых НИСом Гидропроекта, а в приложениях *2, 3* сведения по фильтрационной КИА на участке подземного здания Рогунской ГЭС и в катастрофическом водосбросе Нурекской ГЭС.

1.26. Для обеспечения надежности и сохранности КИА, надлежит ее размещать в потернах, галереях, шахтах, нишах, подходных выработках и других местах, недоступных для лиц, не имеющих к КИА отношения.

Необходимо также учитывать относительно небольшую продолжительность работоспособности закладываемых приборов и их чувствительность к механическим воздействиям при их установке. В практике известно много случаев нарушения приборов в процессе строительных и цементационных работ. Пьезометры, кроме того, подвержены кольматации.

1.27. Результаты наблюдений за фильтрацией в подземных сооружениях целесообразно оценивать совместно с результатами наблюдений за напряженно-деформированным состоянием породного массива и обделки, режимом общей фильтрации на участке расположения сооружения, температурой фильтрующейся воды и т. п.

Результаты контрольных наблюдений и специальных исследований после их обобщения должны быть использованы при составлении предложений по ремонтным работам, а также при проектировании новых объектов.

При наличии квалифицированных инженерных кадров на крупных гидроузлах следует стремиться к возможно более полному анализу результатов наблюдений силами самого эксплуатационного персонала, который должен также принимать непосредственное участие в тарировке и наладке всей аппаратуры.

В необходимых случаях могут быть даны рекомендации о привлечении проектных, научно-исследовательских и других организаций для консультаций по сложным вопросам оценки фильтрационной обстановки на участке сооружения и участия в разработке мероприятий по снижению вредного воздействия фильтрации в сооружения или из них.

1.28. Организация натурных наблюдений за фильтрацией должна определяться «Указаниями по организации и проведению натурных наблюдений на строящихся гидротехнических сооружениях» [13].

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПЕРИОД ИЗЫСКАНИЙ И СТРОИТЕЛЬСТВА

2.1. Гидрогеологические условия участка строительства являются одним из основных природных факторов, определяющих инженерно-геологические условия возведения и эксплуатации подземных гидротехнических сооружений.

В процессе инженерно-геологических изысканий для подземных гидротехнических сооружений выясняют необходимые характеристики общих гидрогеологических условий и параметры отдельных водоносных горизонтов [6, 14].

2.2. Основными вопросами, подлежащими освещению при характеристике гидрогеологических условий, являются:

стратиграфическое положение, литологический состав, условия залегания водовмещающих пород и основных водоупоров;

гидравлические типы основных водоносных горизонтов, их распространение и мощность;

условия питания, циркуляции и дренирования водоносных горизонтов, положение уровней и режим подземных вод;

водопроницаемость и водообильность пород;

химизм и агрессивность подземных вод по отношению к бетону и другим строительным материалам.

Если подземные воды в районе подземного сооружения могут подпитываться атмосферными осадками или поверхностными водами, и если подпитка может заметно поднять уровень подземных вод, то при изысканиях необходимо давать количественную оценку такого поднятия.

2.3. Для изучения гидрогеологических вопросов могут выполняться: гидрогеологическая съемка, бурение гидрогеологических скважин, опытно-фильтрационные работы и некоторые специальные исследования: изучение направления и действительных скоростей движения подземного потока; выявление карстовых полостей, путей движения сосредоточенных подземных потоков; изучение фильтрационной устойчивости пород, возможности развития химической и механической суффозии; возможности химического кольматажа дренажных устройств.

Кроме того, в процессе изысканий следует проводить специальные исследования по изучению фильтрации в массиве в его естественном состоянии и после проведения цементации породы. В районе карста необходимо изучать суффозионную устойчивость пород на специально устраиваемых для этих целей опытных участках.

По трассам глубоко заложенных туннелей и других подземных сооружений должны быть определены уровни естественных подземных вод и организованы гидрогеологические наблюдения в скважинах, горных выработках и на источниках, и эти наблюдения впоследствии должны быть продолжены в период строительства, а в случае необходимости и в период эксплуатации сооружений.

Данные о химизме подземных вод должны отражать все возможные его изменения по характерным сезонам года.

2.4. Изучение гидрогеологических условий должно давать достаточный материал для прогноза возможных притоков воды в подземные выработки, определения напоров подземных вод, действующих на обделки сооружений, и оценки агрессивности воды по отношению к бетону и другим строительным материалам.

2.5. Прогноз притока воды в подземные выработки является одной из сложнейших задач гидрогеологических исследований. Наибольшую трудность представляет прогноз притоков трещинно-напорных вод, приуроченных к зонам тектонических нарушений и карстовых вод, поэтому изучение разломов и сопровождающих их зон *милонитизации, дробления и трещиноватости* следует производить с особой тщательностью, так как при пересечении их подземной выработкой обычно увеличивается приток подземных вод.

С другой стороны, тектонические зоны могут служить естественными преградами для движения подземных вод в массиве и пересечение их туннелем приведет к прорывам в последний значительных количеств воды.

Для определения ожидаемого притока подземных вод в выработки используют следующие основные методы: аналитический, гидрогеологических аналогий, водного баланса и моделирования.

2.6. Для изучения водопроницаемости и водообильности породных массивов в соответствующих разведочных выработках выполняют опытные откачки, наливы и нагнетания воды [6], которые производят с целью прогноза водопритоков или возможной фильтрации воды из туннелей и оценки поглощения материалов при создании противофильтрационных завес. При этом практически водоупорными считают породы, характеризующиеся удельными водопоглощениями менее 0,01 л/(мин·м²).

2.7. Для безнапорных подземных сооружений установление уровней и напоров подземных вод необходимо для определения нагрузок на обделки сооружений, водопритоков, мощности водоотливных средств и пропускной способности дренажных и водоотводных устройств. Знание этих параметров фильтрационного потока необходимо также для оценки возможного развития некоторых инженерно-геологических процессов, связанных с разгрузкой подземных вод (суффозионного выноса частиц, вымыва

заполнителя трещин, прорыва подземных вод в выработку, деформаций пород под напором воды, гравитационного уплотнения и осадок пород в пределах воронки депрессии и т. д.).

При определении давления воды на обделку необходимо учитывать дренирующее значение поверхностной эрозионной сети и самих подземных выработок, а в зоне подпора воды в водохранилище и обходного фильтрационного потока — возможное повышение уровня.

2.8. Оценка агрессивности подземных вод производится с учетом изменения ее по временам года, а также в результате подтока вод из различных водоносных горизонтов, дренируемых выработкой, и смешения вод различного химического состава [15].

2.9. При проведении изысканий изучают также процессы и явления в массиве горных пород и на поверхности земли, связанные с подземными водами:

карст [16], суффозия [17], плывунные явления, набухание пород;

процессы, обусловленные водоотливом и понижением уровней подземных вод: уплотнение пород, образование на поверхности земли мульд и трещин оседания, изменение гидростатического и гидродинамического давления, напряженного состояния пород и их устойчивости, интенсификацию или уменьшение суффозии, движение плывунов.

Процессы, связанные с действием подземных вод, а также с водоотливом и водопонижением, обычно бывают приурочены к определенным литологическим комплексам пород. Неблагоприятными с точки зрения возможного пересечения крупных карстовых полостей и связанных с ними скоплений подземных вод считаются известняки, а также комплексы гипсоносных и соленосных пород. Суффозионные и плывунные процессы, а иногда сдвижение пород и оседания кровли связаны с комплексом рыхлых водоносных пород.

Неблагоприятными с точки зрения прорывов подземных вод являются участки пересечения туннелями зон крупных разрывных тектонических нарушений, рыхлых крупнообломочных и песчано-глинистых пород, полускальных пород, участков пород с мелкой складчатостью и перемятостью.

Прорыв подземных вод сопровождается обычно выносом породы. Такие прорывы возможны по карстовым полостям, по трещинам в сильно водопроницаемых породах, по крупным тектоническим разломам, при пересечении выработкой древних эрозионных понижений, выполненных водонасыщенными песчано-глинистыми породами типа плывунов.

Известны примеры, когда участки с тектоническими нарушениями, где ожидается большой приток подземных вод, обходили туннелями, что приводило к увеличению их общей длины [18]. Аналогичные случаи имели место в отечественной практике при

строительстве туннелей, например, ХрамГЭС-2, Арпа-Севан [19] и др.

Из карстовых полостей подземные воды могут поступать под большими напорами и с большим расходом. В районах с резко расчлененным рельефом инфильтрация осадков происходит с большими гидравлическими градиентами, что способствует развитию преимущественно вертикальных карстовых форм.

Изучение этих явлений необходимо производить в увязке с общими геологическими условиями района строительства.

К набуханию при увлажнении склонны такие породы, как глины, глинистые сланцы, алевролиты, аргиллиты, слабые мергели и туффиты.

2.10. Исследование отмеченных явлений при неглубоком заложении подземных сооружений производят с помощью буровых скважин в процессе разведочных работ и уточняют в процессе проходки выработки путем бурения отдельных опережающих скважин и геофизическими методами. При глубоком заложении подземных сооружений прогнозирование неблагоприятных явлений, связанных с прорывом в подземную выработку больших объемов воды, осуществляют путем бурения опережающих скважин.

2.11. Наблюдение за указанными выше неблагоприятными процессами и явлениями на стадии изысканий и строительства осуществляет инженерно-геологическая служба, которая дает качественную и количественную их оценку, обоснование и рекомендации по предупреждению опасных процессов или борьбе с их вредным влиянием.

Породы, содержащие растворимые соли (гипс, ангидрит, каменная соль), должны подвергаться химическому анализу.

2.12. На стадии строительства выполняют необходимые дополнительные гидрогеологические изыскания, опытные работы и специальные исследования, документируют водопроявления (кустовые и одиночные откачки [20], нагнетания [21], наливы и стационарные наблюдения за режимом подземных вод).

2.13. Водопроницаемость и водоносность уточняют с помощью разведочных работ. С этой целью по трассам туннелей и на участках расположения подземных камер проходят буровые скважины, а на участках неглубокого заложения сооружений — горные выработки. Разведочные выработки закладывают на наиболее важных и сложных в гидрогеологическом отношении участках, к которым относятся контакты и зоны тектонических нарушений, участки развития оползней, карста, пород с повышенной водоносностью, участки прохождения туннелей под современными и погребенными эрозионными понижениями рельефа.

В документации водопроявлений должны быть отражены места выходов и расходы притекающих в выработку подзем-

ных вод, их химические свойства и агрессивность по отношению к бетону.

По характеру водопритока выделяют следующие участки массивов горных пород:

практически безводные (капеж отсутствует);

слабый капеж — до 10 капель в секунду с 1 м² пролета выработки;

средний капеж — более 10 капель в секунду с 1 м² пролета выработки, отдельные прерывистые струи;

сильный капеж, местами со сплошными струями;

сосредоточенные выходы подземных вод в виде родников.

Приток подземных вод в выработки на характерных участках следует определять по работе насосов при водоотливе или с помощью водосливов, устанавливаемых в канавах, кювстах, лотках, а также объемным способом — по скорости заполнения зумпфов, водосборников и других емкостей.

В случаях приближения при проходке выработок к участкам залегания пород, неблагоприятных по наличию в них крупных карстовых полостей, скоплений воды, плывунов и т. п., в их забоях следует проводить дополнительные исследования, сопровождающиеся проходкой опережающих буровых скважин или штолен. Для этой цели могут быть использованы также геофизические методы разведки (электропрофилирование, статическое и радиоволновое просвечивание и др.).

3. НАБЛЮДЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1. Вопрос силового воздействия подземных вод на обделки подземных сооружений еще не нашел своего окончательного разрешения. Если давление на металлические облицовки является на сегодня общепризнанным фактом, то в вопросе давления подземных вод на бетонные обделки и особенно при наличии противофильтрационной цементации у специалистов нет единого мнения.

Считают, что при расчете бетонных или железобетонных обделок напорных туннелей и шахт на внутреннее давление, если вокруг обделки имеются слабоводопроницаемые породы или кольцо зацементированных пород, следует учитывать противодавление профильтровавшейся из туннеля воды на наружную поверхность обделки [3].

3.2. Величину противодавления можно рассчитать по [22, 23]. При наличии естественных подземных вод обделка работает на разность между давлением воды внутри водовода и давлением подземных вод на обделку.

В случаях, когда эта разность давлений направлена от обделки в сторону породы и является определяющей при расчете

обделки на прочность, учет давления естественных подземных вод позволяет разгрузить, а следовательно, удешевить обделку и получить соответствующий экономический эффект при строительстве. Поэтому важно при натурных исследованиях и наблюдениях установить наименьшее давление подземных вод на обделку.

При расчете обделки на прочность и устойчивость (например, при наличии стальной облицовки) определяющей основной нагрузкой является наибольшее давление подземных вод на обделку.

Натурные исследования и наблюдения желательно программировать так, чтобы получить упомянутые выше экстремальные значения давления естественных подземных вод на обделку. Для определения этих давлений наблюдения должны выполняться периодически за время не менее одного года. При этом необходимо фиксировать отметки поверхности подземных вод.

3.3. По вопросу количественной оценки величины противодавления подземных вод пока еще нет единого мнения. Большинство специалистов (в их числе и авторы) считают, что коэффициент площади передачи давления α_2 на поверхности *примыкания бетонной обделки к породе равен единице* [24]. При этом, хотя многие скальные массивы обладают малой водопроницаемостью, при которой расход воды в них близок к нулю, гидростатическое давление в них хорошо передается.

Согласно другой концепции вследствие невысоких значений коэффициента трещинной пустотности скальных пород фильтрационное давление на обделку в натуре принимают передающимся не на всю площадь, а только на часть ее, соответствующую площади трещин и неплотностей на контакте скалы с бетоном.

Причинами такого различия в подходе к решению проблемы давления подземных вод являются: большое разнообразие геологических, гидрогеологических условий, компоновочных и конструктивных решений по подземным сооружениям; сложность воспроизведения натурных исходных данных в условиях лабораторного физического или математического моделирования; недостаточный объем натурных данных о давлении подземных вод на обделки сооружений; необходимость учета во многих случаях проницаемости бетонных (железобетонных) обделок сооружений; сложность, длительность и значительная стоимость проведения опытных полевых исследований для получения исходных данных.

3.4. В практике известны случаи, когда вследствие неучета давления подземных вод имели место случаи разрушения стальных облицовок напорных туннелей и шахт при их опорожнении. И несмотря на это, бытует необоснованное мнение, что в реальных сооружениях со стальной облицовкой имеет место отвод

фильтрационного потока вдоль по обделке в нижний бьеф [25] и что размеры такой разгрузки следует тщательно обследовать в натурных условиях.

Однако, как правило, проектировщики учитывают давление подземных вод на обделки подземных сооружений (особенно при наличии стальных водонепроницаемых облицовок) и для их разгрузки применяют всевозможные дренажные устройства, иногда довольно сложные. Рассмотрим два примера.

Напорный туннель Теребля-Рикской ГЭС диаметром 2,5 м и длиной 3,7 км прорезает на глубине 600 м водораздельный хребет между реками Теребля и Рика, сложенный трещиноватой породой. В условиях обводненного трещиноватого горного массива туннель оказался большой искусственной дреной. Для разгрузки обделки туннеля от давления подземных вод был осуществлен шпуровой (скважинный) дренаж. Замеры, проведенные после бетонирования обделки, показали, что давление подземных вод на обделку в центральной части туннеля снизилось до 0,2 МПа, где из 1700 шпуров в обделке более 600 оставлены открытыми. Многие из них фонтанировали под значительным давлением [26].

В напорной шахте ГАЭС Вальдек-II для разгрузки стальной облицовки от давления подземных вод применили съемные заглушки. Заглушки диаметром 30 мм устроены по две штуки в сечениях, расположенных на расстоянии 9 и 18 м друг от друга. Когда заглушки открыты, максимальный напор подземных вод на контакте между оболочкой водовода и бетоном составляет 5,5 м при расстоянии между сечениями с заглушками 9 м и 11,0 м — при расстоянии 18 м. Открытие разгрузочных отверстий осуществляют при медленном понижении уровней воды в водоводе персоналом, находящимся в тележке, опускаемой в водовод через люк из помещения для подземных механизмов. При заполнении водовода производят вворачивание заглушек в отверстия [27].

3.5. При проектировании подземных сооружений, испытывающих давление подземных вод, отсчет величины давления производят:

при расположении сооружений под ложем водохранилища — от отметки НПУ;

при расположении под зеркалом депрессионной поверхности (имеющей уклон i) при $i \leqslant 0{,}1$ — от уровня последней в створе сооружения, при $i > 0{,}1$ — по сетке фильтрационного потока;

при наличии дренажа — с учетом его влияния, определенного расчетом или на модели.

3.6. Согласно [3] давление подземных вод относится к временной длительной нагрузке, и при расчете обделок туннелей на прочность и устойчивость принимается с коэффициентом перегрузки 1,1 (0,9). При этом коэффициент перегрузки, указанный в скобках, относится к случаям, когда применение минимального его значения приводит к невыгодному случаю загружения обделки. В случае определения давления подземных вод в результате натурных наблюдений коэффициент перегрузки принимают равным 1.

3.7. В некоторых случаях учитывают дренирующий эффект самой обделки, имеющей те или иные дефекты (трещины, скопления крупного заполнителя бетона, не омоноличенные швы,

отверстия для цементации). Так, в [28] сказано, что в условиях Донбасса гидростатическое давление на обделки выработок в ряде случаев достигает 6 — 7 МПа (600 — 700 тс/м²), при котором толщина бетонной обделки будет исчисляться метрами.

Однако, по мнению авторов [28], при подаче бетонной смеси за опалубку вода, поступающая из трещин скального массива, размывает свежеукладываемую бетонную смесь, формируя в ней до начала схватывания каналы, по которым она затем свободно изливается в ствол, освобождая обделку от гидростатического давления.

3.8. Изложенное выше показывает, что фактическую величину давления подземных вод на обделки подземных сооружений, особенно тех, которые расположены в скальных породах, необходимо определять в результате проведения натурных наблюдений. Так, например, при строительстве Ялтинского гидротехнического туннеля было установлено, что определение расчетного давления на обделку в породах типа аргиллитов и алевролитов при наличии подземных вод должно выполняться только путем замера его в натуре [29].

3.9. При выполнении натурных наблюдений за давлением подземных вод необходимо учитывать возможное наличие связи получаемого фильтрационного поля с другими источниками питания, а также с карстовыми полостями, в том числе «висячими». Следует также увязывать давление подземных вод на обделки со временем года.

3.10. При расположении подземных сооружений в сейсмически активных районах желательно предусматривать закладку специальных малоинерционных первичных преобразователей-датчиков гидродинамического давления для определения изменения давления подземных вод при землетрясениях.

3.11. Для получения более достоверных данных в сложных гидрогеологических условиях и для особо ответственных сооружений следует дублировать измерения, закладывая рядом приборы одинаковых, а лучше разных систем с тем, чтобы после отказа одного из приборов измерительная точка продолжала функционировать.

3.12. В местах пересечения трассой водовода зон разрушенных сильнопроницаемых или ослабленных пород, слабопроницаемых пластов, иногда создающих значительный подпор подземных вод, следует учащать закладку приборов для наблюдения за силовым воздействием подземных вод и уделять таким местам большее внимание, уменьшая промежутки времени между измерениями по сравнению с таковыми на участках трассы с более простой инженерно-геологической обстановкой.

3.13. В комплекс наблюдений, относящихся к силовому воздействию подземных вод, входят наблюдения за следующими параметрами:

поверхностью подземных вод;

давлением их в массиве пород;

давлением подземных вод в противофильтрационных экранах;

давлением подземных вод на бетонную (железобетонную) обделку и в порах и швах бетона;

давлением подземных вод на стальную облицовку или гидроизоляцию из другого материала.

3.14. В [30] отмечено, что для безопасности сооружения Н. Паркман (Великобритания) считает необходимыми регулярные и непрерывные измерения характеристик фильтрационного потока и наблюдения за ним в течение срока службы сооружения. Наблюдения за фильтрацией рекомендуется проводить визуально 1 раз в неделю, с измерением давлений — 1 раз в месяц, с измерениями давлений и расходов и оценкой состояния сооружений — 1 раз в три месяца. Там же [30] говорится, что по сведениям Т. Abraham и L. Lubdin (США) наблюдения за фильтрационными расходами и противодавлением в плотинах проводятся не менее четырех раз в год: при максимальных уровнях водохранилища, наполнении его и опорожнении.

СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

3.15. По трассе напорных туннелей следует закладывать пьезометрические скважины для наблюдения за депрессионной поверхностью грунтовых вод и ее колебаниями во времени. Такие скважины попутно можно использовать для герметизированного вывода через них труб, служащих для периодических измерений пьезометрического напора воды в туннеле с целью определения гидравлических потерь на участке туннеля. Примером туннеля с высоким расположением поверхности депрессии подземных вод вдоль его трассы является Шамбский туннель в Армении [22].

В характерных поперечниках сооружения (туннели, шахты и т. п.) необходимо закладывать пьезометры или датчики для определения порового давления воды в теле обделки, на контакте ее с породой и внутри породы на разных расстояниях от обделки сооружения. При наличии противофильтрационной цементации приборы устанавливают также внутри зацементированной породы. Такая расстановка датчиков позволит оценить эффективность противофильтрационной цементации и проницаемость обделки, позволит отбирать пробы воды для оценки ее химического состава.

Обработку и анализ результатов перечисленных наблюдений целесообразно производить аналогично, например, рекомендованным в [77].

3.16. Способы измерения давления подземных вод могут быть прямые и косвенные.

К прямым относятся способы непосредственного измерения давления подземной воды, к косвенным — способы определения давления подземной воды расчетом исходя из определенных в натуре показателей фактического напряженно-деформированного состояния обделки, вызванного всем комплексом нагрузок и воздействий на обделку.

Для прямых измерений давления и уровня подземных вод применяют пьезометры.

ПЬЕЗОМЕТРЫ

3.17. Назначение пьезометров, устанавливаемых в подземных сооружениях, окружающей скальной породе, — измерение пьезометрических напоров в отдельных точках (иногда на участках линии или поверхности) породы и обделки сооружений.

Основные части пьезометра: водоприемник с отстойником, труба пьезометра и устье пьезометра.

Водоприемник воспринимает пьезометрический напор в заданной точке. Конструкция водоприемника должна быть незаиляемой частицами грунта и стойкой против коррозии.

Труба пьезометра одиночная или парная соединяет водоприемник с устьем пьезометра — местом измерения уровня или давления. Труба должна быть водонепроницаемой и стойкой против коррозии.

Устье пьезометра (оголовок) — выходная его часть, предназначенная для размещения приборов или приспособлений, позволяющих измерять пьезометрический уровень в точке расположения водоприемника.

Классификация пьезометров [31]

По способу установки:

закладные — пьезометры, устанавливаемые в сооружение в процессе его бетонирования;

опускные — пьезометры, опускаемые (вводимые) в собранном виде в скважину, пробуренную в строящемся или готовом сооружении (рис. 6 и 8 приложения 2).

По местоположению водоприемника:

контактные — устанавливают на контакте бетонной обделки с породой;

глубинные — устанавливают в породе на различном расстоянии от поверхности бетонной обделки (рис. 4 — 6 приложения 3).

По местоположению устья:

открытые или *безнапорные* — пьезометры, устье которых расположено выше уровня пьезометрической поверхности (рис. 8 приложения 2);

напорные или *изливающиеся* — пьезометры, устье которых расположено ниже уровня пьезометрической поверхности (рис. 6 и 7 приложения 2).

3.18. Пьезометры с вертикальной трубой, у которых пьезометрический напор измеряется не в точке, а вдоль линии, — шахтные пьезометры. Правильнее их называть вертикальными линейными пьезометрами.

Такие пьезометры обычно применяют для наблюдения за положением поверхности на ее пологих участках, а для наблюдения за положением поверхности депрессии на ее крутых участках, а также для наблюдения за напорами подземных вод в зоне значительного отклонения от вертикали живых сечений фильтрационного потока применяют группу точечных пьезометров, расположенных вблизи друг от друга. С целью удешевления и сокращения количества скважин, можно водоприемники группы точечных пьезометров расположить на общей оси единой скважины, тщательно затампонировав промежутки между соседними водоприемниками, а трубы от этих водоприемников вывести через единую скважину к ее устью.

3.19. Конструкцию основных частей пьезометра и способ его устройства предусматривают проектом в зависимости от характера пород, вмещающих сооружение, вида сооружения и условий производства работ по его возведению.

Много полезных сведений по конструкциям пьезометров, их выбору, размещению, проверке качества монтажа труб, эксплуатации пьезометров, их защите от повреждений, обработке результатов измерений имеется в нормативно-методической литературе [31 — 34 и др.]; монографиях [35 — 37 и др.]; в Трудах координационных совещаний по гидротехнике (вып. 19, 29, 48, 49, 63, 68), в Дополнительных материалах к вып. 91, в Материалах конференций и совещаний по гидротехнике [38] и других выпусках Материалов Международных конгрессов по большим плотинам: VIII (Эдинбург, 1964 г.) по вопросу 29, IX (Стамбул, 1967 г.) по вопросу 34, X (Монреаль, 1970 г.) по вопросу 38, XI (Мадрид, 1973 г.) по вопросу 42, XII (Мехико, 1976 г.) по вопросу 45 [30].

Значительный интерес представляет выполненная ВНИИГом (1968 — 1969 гг.) разработка каталога по выбору рациональных конструкций пьезометров для трещиноватых скальных оснований [39]. В работе дано описание отдельных типов пьезометров, установленных на крупнейших узлах нашей страны и хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации. Приведены данные справочного характера о материалах для труб и фильтров пьезометров, о приборах для измерения пьезометрического давления, а также краткие результаты опроса групп натурных наблюдений крупнейших отечественных ГЭС.

Несколько позже (1971 г.) НИС Гидропроекта издал Каталог контрольно-измерительных приборов, выпускаемых странами — членами СЭВ для натурных исследований гидротехнических сооружений [40]. В Каталоге приведены схемы установок пьезометров различных типов, их параметры; сведения о венгер-

ском транзисторном измерителе уровня воды в безнапорных пьезометрах; схема и параметры прибора для дистанционного измерения небольших фильтрационных расходов воды в лотке. Большая часть сведений по пьезометрам взята из нормативно-методического источника [31], упоминавшегося выше.

3.20. Пьезометр безнапорный с вертикальной трубой

Для измерения уровня воды в безнапорном пьезометре с вертикальной трубой можно применить лот с мерным тросом (лот-свисток, лот-хлопушку, лот с электрической сигнальной лампочкой), которым пользуются при гидрогеологических исследованиях.

При трубе пьезометра диаметром не менее 50 мм удобен измеритель горизонта воды конструкции НИСа Гидропроекта [33, с. 74].

3.21. Уровнемер пневматический

Для этой же цели можно использовать пневматический уровнемер [21], принцип работы которого показан на рис. 1. Уровнемер состоит из тонкой трубки (из металла или пластмассы) или тонкого резинового шланга *1* с разметкой длины, опускаемых в пьезометрическую трубу несколько ниже уровня воды, ртутного или водяного манометра *2*, воздушного (например, велосипедного) насоса *5*, резиновой трубки *4*.

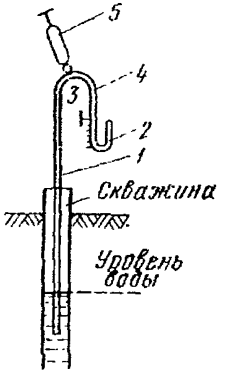


Рис. 1. Схема пневматического уровнемера

1 — трубка с разметкой длины; *2* — ртутный или водяной манометр; *3* — кран; *4* — трубка резиновая; *5* — насос воздушный.

Для замера уровня опускают в воду конец шланга (трубки), закрывают кран *3*, отделяющий шланг *1* от манометра. Накачивая насосом воздух, вытесняют из шланга воду и открывают кран. Манометр покажет давление воздуха в шланге, создаваемое столбом воды над концом шланга. Если манометр ртутный, то надо учитывать, что 1 мм ртутного столба соответствует 13,6 мм водяного столба. Воздух надо подкачивать при каждом замере уровня. Манометр должен быть защищен от действия солнечных лучей.

Можно закрепить неподвижно трубку *1* (рис. 1), зафиксировать высотную отметку нижнего конца трубки. При этом нижний конец трубки *1* должен быть расположен ниже наинизшего уровня воды в пьезометре, который будет в течение всего времени его эксплуатации. Тогда по показанию манометра *2* во время прокачки воздуха через трубку *1*, зная отметку верхнего края трубы пьезометра у его устья, нетрудно подсчитать высотную отметку уровня воды в пьезометре.

Таким способом, заложив и закрепив заранее (во время укладки трубы пьезометра в сооружение) воздушную трубу, можно измерять уровень воды в безнапорном пьезометре с пологонаклонной его трубой или даже при наличии поворотов (колен) в трубе пьезометра, в которую нельзя ввести обычный измерительный лот.

3.22. Уровнемер акустический

Уровнемер для измерения положения уровня воды в пьезометрах состоит [41] из погружаемой в пьезометр гибкой пластиковой трубки и присоединенного к верхнему ее концу наушника с отверстием. На оголовке пьезометра устанавливается патрубок-тройник с открытым боковым отверстием, около которого возбуждаются какие-либо звуки (голосом, свистком, карманным транзисторным радиоприемником и т. п.). При открытом нижнем конце трубки звук хорошо слышен в наушнике; в момент соприкосновения нижнего конца трубки с уровнем воды звук исчезает. Трубка имеет разметку через 10 см, а на верхнем патрубке пьезометра установлена линейка с миллиметровой шкалой. Диаметр трубки должен быть примерно вдвое меньше диаметра трубы пьезометра. Авторы уровнемера применяли пластиковую трубку диаметром 6,2 мм для измерений в пьезометрах диаметром 12,5 мм. Точность измерений составляет 1 мм, ошибка не превышает 0,05 мм/м.

3.23. Пьезодинамометр струнный

Обычным (без дистанционной передачи показаний) безнапорным пьезометром, а также напорным пьезометром, снабженным на оголовке его устья пружинным манометром (типа Бурдона, сведения о таких манометрах имеются, например, в [35, 42] и ГОСТах), целесообразно пользоваться при небольшом числе пьезометров. При большом числе их и значительных расстояниях между ними быстрее и оперативнее применять дистанционную передачу показаний пьезометров на центральный щит, как принято поступать на крупных сооружениях.

С этой целью обычно пользуются струнным пьезодинамометром. При безнапорном пьезометре его подвешивают в трубе пьезометра ниже уровня воды в нем, а при напорном пьезометре закрепляют над его устьем таким образом, что давление воды передается на мембрану пьезодинамометра. Для этого удобно применять струнный пьезодинамометр конструкции НИСа Гидропроекта [33], имеющий удлиненную форму и небольшой диаметр, позволяющий установить его в трубе с внутренним диаметром 60 мм и более.

Для измерения давления воды в порах и швах бетона на контакте бетона с породой удобнее применять пьезодинамометр конструкции ВНИИГа [33], имеющий форму цилиндрической коробки с диаметром 126 мм и высотой 40 мм.

Оба названных типа пьезоманометров способны работать в средах с низким коэффициентом фильтрации, что обусловлено весьма малой объемной деформацией упругого элемента прибора. Для измерений напора могут быть использованы также дренажные скважины [43]; для этого они оборудуются крышками, позволяющими запирать скважину и подключать манометр для измерения расхода.

3.24. Система средств измерений, разработанных на базе единого унифицированного струнного преобразовательного модуля, позволяет производить контроль состояния гидротехнических сооружений по гидростатическому, гидродинамическому, фильтрационному и поровому давлению в пределах от 0,02 до 10 МПа, температуру сооружений и оснований в пределах от минус 30 до +60° С, уровни воды на мерных водосливах дренажных коллекторов в пределах от 0,2 до 400 мм.

Струнные преобразователи всех типов обслуживаются единым вторичным прибором ПЦП (периодометр цифровой портативный), работающий в стационарных и полевых условиях. Прибор осуществляет возбуждение струнного преобразовательного модуля и цифровое измерение информационного параметра сигнала [12].

3.25. Вакуум-пьезометр для измерения порового давления в грунте

В НИИ оснований и подземных сооружений имени Н. М. Герсеванова сконструирован и испытан в производственных условиях специальный вакуум-пьезометр для измерения положительного и отрицательного порового давления в грунте [44].

Вакуум-пьезометр (рис. 2) представляет собой герметичный бачок, образуемый двумя трубами — наружной *1* ($d = 2{,}5''$), внутренней *2* ($d = 3/4''$) и двумя кольцеобразными крышками, приваренными к трубкам сверху и снизу. Нижняя крышка *3* сплошная, а в верхней *4* просверлены два отверстия: одно для штуцера *5* ($d = 5 \div 6$ мм), второе для электрического контакта *6* ($d = 8 \div 10$ мм).

Рабочая камера *7* пьезометра сообщается с грунтовой водой через перфорированную часть наружной трубы, покрытой со стороны, обращенной к грунту, латунной сеткой *8*.

На наружной трубе вверху и внизу сделана с внешней стороны резьба ($d = 2{,}5''$), что позволяет собрать колонну труб с несколькими пьезометрами.

От каждого прибора на дневную поверхность выводится резиновая трубка $d = 6 \div 7$ мм и одножильный электрический провод с наружной изоляцией.

Резиновая трубка *9* одним концом плотно соединяется со штуцером *5*, а вторым концом на поверхности земли с мановакумметром *11* (при точных измерениях — ртутным). Электриче-

ский провод *10* заканчивается контактом *6*, находящимся под верхней крышкой камеры. Второй конец провода выводится наверх и соединяется с тестером *12*.

При монтаже в одной колонне *13* нескольких пьезометров *14* провода и резиновые трубки, идущие из нижних приборов, пропускаются через трубу *2* верхнего бачка, которая предназначена также для прохода воды при гидравлическом погружении колонны.

При этом на нижний конец колонны надевается обычный наконечник иглофильтра с шаровым клапаном.

После погружения зазор между колонной и стенками скважины засыпается грунтом и уплотняется.

Принцип работы вакуумпьезометра состоит в том, что давление поровой воды через перфорированную часть бачка передается во внутреннюю полость, а оттуда через столб воздуха, находящийся в резиновой трубке, — на мановакуумметр. Уровень воды поддерживается в пределах бачка. Для пуска необходимо замкнуть электрическую цепь с корпусом колонны. Если при этом тестер показывает наличие тока, то это означает, что камера затоплена, и уровень воды находится выше электроконтакта. Затем обычным ручным насосом в резиновую трубку нагнетается воздух и вода отжимается до уровня ниже контакта. Тогда цепь разрывается, и тестер показывает отсутствие тока. После этого подача воздуха прекращается и трубка соединяется с мановакуумметром. В процессе работы пьезометров регулярно проверяется электроцепь, и в случае наличия тока осуществляется повторный пуск.

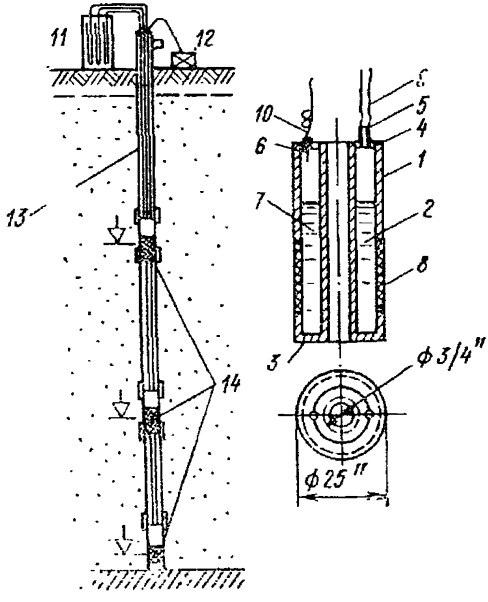


Рис. 2. Схема вакуум-пьезометра

1 — труба наружная; *2* — труба внутренняя; *3* — крышка нижняя; *4* — крышка верхняя; *5* — штуцер; *6* — контакт электрический; *7* — камера рабочая; *8* — сетка латунная; *9* — трубка резиновая; *10* — провод электрический; *11* — мановакуумметры; *12* — тестер; *13* — колонна; *14* — пьезометры.

Полевое испытание вакуумпьезометров проводилось на строительной площадке у Мееровского проезда в Москве, где в мелкозернистых песках с $k = 0{,}5 \div 1$ м/сутки велась щитовая проходка под защитой вакуумных скважин.

Створ пьезометров располагается перпендикулярно к ряду работающих вакуумных скважин. Первая колонна пьезометров

была установлена на расстоянии 0,5 м от действующей скважины, вторая — 1,5 м, третья — 4 м. Наибольшая глубина заложения пьезометров составила 8 м. Приборы показали, что максимальная величина вакуума в грунте (на расстоянии 0,5 м от скважины) достигала 280 мм рт. ст.

На опытном участке глубинного вакуумирования в районе Ленинских гор водоносный слой состоял из мелкозернистых илистых песков ($k = 0{,}2 \div 0{,}8$ м/сутки), расположенных от дневной поверхности до глубины 8 — 8,5 м. Ниже этой отметки залегали плотные суглинки. Пьезометры были опущены на глубину 8 — 8,5 м.

Непосредственно в обсыпке скважины они показали вакуум в 200 мм рт. ст. В остальных пьезометрах, установленных на расстояниях 1, 2 и 4 м от вакуум-скважины, наблюдались положительные давления, по которым строилась депрессионная кривая.

В тех случаях, когда приемные отверстия пьезометров попадают в неблагоприятные условия (в глинистую среду), наблюдается замедленное изменение показаний на мановакуумметре, что объясняется медленной фильтрацией воды в бачок или из бачка в грунт. Ускорения можно достигнуть путем искусственного «приближения» показания мановакуумметра к величине, соответствующей поровому давлению в грунте на отметке приемных отверстий пьезометров. Для этой цели необходимо накачивать или откачивать воздух из резиновой трубки до тех пор, пока показание мановакуумметра не установится. Полученная величина будет соответствовать поровому давлению в грунте. Этим же способом можно пользоваться при определении поровых давлений в слабопроницаемых грунтах.

3.26. Пьезометр напорный с несколькими водоприемниками в одной скважине

Пьезометр с несколькими водоприемниками (фильтрами) в одной скважине ненадежен для скальных пород из-за трудности обеспечения гидроизоляции участков между соседними водоприемниками. От этого недостатка свободен пьезометр, показанный на рис. 3, в котором гидроизоляцию упомянутых выше участков осуществляют путем нагнетания твердеющего тампонажного раствора (например, песчано-цементного) в интервалы скважины между стенками скважины и трубой, находящиеся между соседними водоприемниками и между верхним водоприемником и устьем скважины. Применение такого пьезометра целесообразно в местах значительного искривления потока, как показано на рисунке, в местах сгущения эквипотенциалей фильтрационного потока, например, около выхода его в дрены, в проницаемые обделки туннелей, особенно при наличии противофильтрационной цементации вокруг обделки. В этих случаях приходится обычно устанавливать несколько «точечных» пьезо-

метров. Применение же пьезометра, показанного на рис. 3, позволяет свести к минимуму длину бурения пьезометрических скважин, сократить расход труб для них и длину тампонируемых участков.

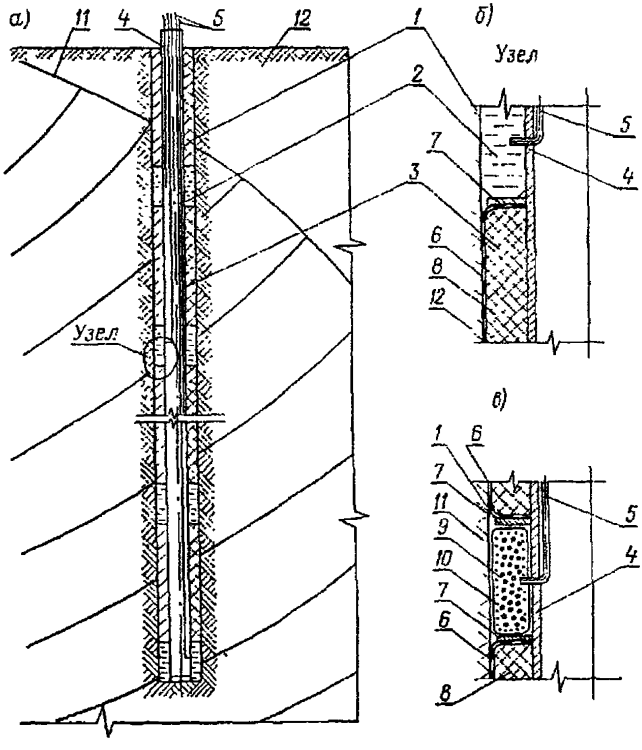


Рис. 3. Схема пьезометра напорного с несколькими водоприемниками в одной скважине

а — общий вид пьезометра; *б* — узел; *в* — деталь цилиндрического водоприемника в суффозионно-неустойчивых грунтах; *1* — скважина; *2* — водоприемники; *3* — тампоны; *4* — труба центральная; *5* — трубки пьезометрические; *6* — резиновые оболочки; *7* — фланцы; *8* — тампонажный раствор; *9* — фильтр (например, крупный песок, гравий); *10* — каркас кольцевой; *11* — депрессионная поверхность фильтрационного потока; *12* — грунт (основание гидротехнического сооружения).

Пьезометр состоит из расположенных на различной глубине в единой скважине *1* нескольких цилиндрических водоприемников *2*, образованных стенками скважин *1* и тампонами *3*, и соединенных с пьезометрическими трубками *5*, выведенными к устью скважины *1*. Цилиндрические водоприемники *2* расположены на различной глубине в одной скважине *1*, причем тампоны *3*, разъединяющие водоприемники *2*, закреплены на центральной трубе *4*, расположенной в скважине *1*, а пьезометрические трубки *5* размещены в полости центральной трубы *4* и выведены к устью скважины *1*. Тампоны *3* могут быть выполнены

в виде кольцевых эластичных камер, например, резиновых оболочек *6*, заполненных твердеющим раствором *8*.

В случае расположения пьезометра в суффозионно-неустойчивых грунтах, цилиндрические водоприемники *2* должны быть заполнены фильтром *9*, выполненным в виде кольцевого каркаса *10*, например, капронового, заполненного гравием и надетого на центральную трубу *4*.

Выполняют устройство следующим образом. В зоне фильтрационного потока *11* в основании *12* гидротехнического сооружения (на чертеже не показано) бурят скважину *1* и опускают в нее пьезометрическую колонну, состоящую из трубы *4*, на которой прикреплены пьезометрические трубки *5*, фланцы *7* и резиновые оболочки *6* тампонов *3*. В каждую полость, образуемую парой смежных фланцев *7*, оболочкой *6* и трубой *4*, введены две трубки (на рисунке не показаны): одна — в нижней части — для подачи твердеющего раствора, другая — в верхней части — для выпуска воздуха. Концы трубок выведены к устью скважины через полость трубы *4* и замаркированы.

Если измерения проводят в основании, сложенным суффозионно неустойчивыми породами, то на участках водоприемников на колонне размещают фильтры *9*.

После опускания колонны в скважину *1* нагнетают раствор *8* в полости, образованные резиновыми оболочками *6*. После твердения раствора образуются тампоны *3*, которые надежно изолируют друг от друга пьезометрические водоприемники *2*.

Фильтрационный поток *11* в основании *12* заполняет цилиндрические водоприемники *2* и пьезометры *5*. При этом уровень воды в пьезометрах устанавливается соответственно тому напору фильтрующейся подземной воды, который имеет в действительности место на уровне соответствующих цилиндрических водоприемников.

Измерение уровней воды в пьезометрах производят, например, хлопушками, электроконтактным лотом или другим способом.

Если в основании сооружения имеет место напорное движение подземных вод, то концы пьезометрических трубок *5* оборудуют оголовками с манометрами или пьезодинамометрами и сливными кранами.

3.27. Электропневматический прибор для измерения порового давления в грунте

Схема пневматического прибора для измерения давлений в порах грунта дана на рис. 4 [45]. Он состоит из коробки *1*, дюймовой трубы *2*, присоединенной к коробке на резьбе, и оголовка *3*, располагающегося над поверхностью земли. Коробка погружается на забой скважины, забуриваемой для установки прибора, и обсыпается чистым песком.

Для обслуживания прибора необходимы насос Комовского [4] и регулирующая емкость (ресивер) [5], которая подключается и к насосу, и к оголовку.

Давление грунтовой воды воспринимает мембрана *6*, плотно зажатая между стаканом коробки и ее крышкой. Над мембраной размещен стержень *7*. Стержень и мембрана являются звеньями способной замыкаться и размыкаться электрической цепи.

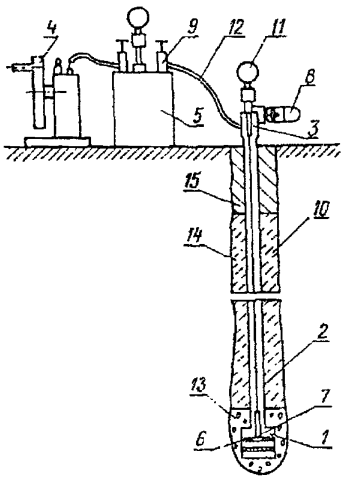


Рис. 4. Схема электропневматического прибора

1 — коробка; *2* — труба дюймовая; *3* — оголовок; *4* — насос Комовского; *5* — ресивер; *6* — мембрана; *7* — стержень; *8* — омметр; *9* — вентиль игольчатый; *10* — провод электрический двухжильный; *11* — мановакуумметр; *12* — трубки; *13, 14, 15* — пласты грунта.

При пользовании прибором вся его внутренняя полость (часть коробки, располагающаяся над мембраной, труба и оголовок) должны быть заполнены воздухом. При равенстве давлений по обе стороны мембраны электрическая цепь оказывается замкнутой, и омметр *8* показывает весьма малое сопротивление. При возникновении отрицательного избыточного давления (вакуума) в грунтовой воде мембрана прогибается вниз, контакт между нею и стержнем нарушается, и омметр начинает показывать бесконечно большое сопротивление.

Замер образовавшегося под мембраной вакуума осуществляется путем снижения давления во внутренней полости прибора. Для этого регулирующая емкость, в которой предварительно насосом создается разрежение, сообщается с оголовком путем открытия игольчатого вентиля *9*. Момент восстановления контакта фиксируется омметром, а величина вакуума над мембраной (а одновременно и под ней) — мановакуумметром *11*, присоединенным к оголовку прибора. Величина положительного давления воды, заключенной в порах грунта, может быть измерена аналогичным образом, но после повышения давления во внутренней полости прибора путем сообщения оголовка с регулирующей емкостью, находящейся под давлением. Перед погружением в грунт стержень каждого прибора должен быть установлен (в лабораторных условиях) в нулевое положение. Это достигается осторожным опусканием стержня до соприкосновения с мембраной, при котором происходит замыкание электрической цепи, что отмечается омметром. Нулевое (или близкое к нему) положение стержня фиксируется контргайкой. Об ошибке в установке стержня можно судить созданием над мембраной давления,

разрывающего электрическую цепь. Величина такого давления не должна превышать 5 — 10 см водяного столба.

Три таких прибора были опробованы при испытаниях опытной установки вакуумного водопонижения на Малой Трубецкой улице в Москве.

3.28. Пьезодинамометр двухтрубный пневматический

Прибор применяется в зарубежной практике, в частности, для измерения порового давления в основании арочной плотины Церврейла (Швейцария) [46]. Прибор работает по принципу вентиля, в котором роль вентиля выполняет мембрана, заложенная в камеру давления прибора. Камера давления с окружающей средой сообщается при помощи пористой керамической пластинки; с тыльной стороны к камере давления подводится сжатый воздух. Если давление воды на мембрану больше давления воздуха, то мембрана прижата к стенке камеры давления; при некотором превышении давления воздуха над поровым давлением воды мембрана отжимается, и начинается движение воздуха из подающей линии (трубы) через камеру давления в обратную линию (трубу); измеряемое поровое давление принимают равным давлению воздуха, при котором началось его движение через камеру давления.

Благодаря малому объему камеры инерционность прибора очень мала и изменения порового давления могут измеряться сразу же после их наступления.

Длина воздушных линий приборов на плотине, названной выше, составляет до 250 м; от всех 16 приборов линии выведены в одну из камер затвора плотины.

Для производства измерений по всем 16 приборам требуется 15 — 20 мин.

Считается возможным использование этого прибора при длине воздушных линий до 500 м.

На плотине Церврейла приборы заложены на трех уровнях в скважинах диаметром 76 мм. Приборы размещены на фильтровых участках длиной по 5 м, заполненных кварцевым песком крупностью 1,5 — 1,2 мм, перекрытых глиняными пробками. На длине между мерными участками скважины зацементированы. Отмечено, что при проходке скважин необходимо проводить опытные работы для уточнения проницаемости пород в зоне закладки каждого из приборов.

По-видимому, эти приборы надежнее и долговечнее струнных пьезодинамометров, в которых струна иногда «ползет»; мембрана же пневматического прибора свободна от этого недостатка.

В [30] сказано, что для измерения давлений фильтрационного потока в теле и основании грунтовой плотины (высотой 183 м) Портидж-Маунтин, сооруженной в 1967 г. в Канаде, применены пневматические пьезометры.

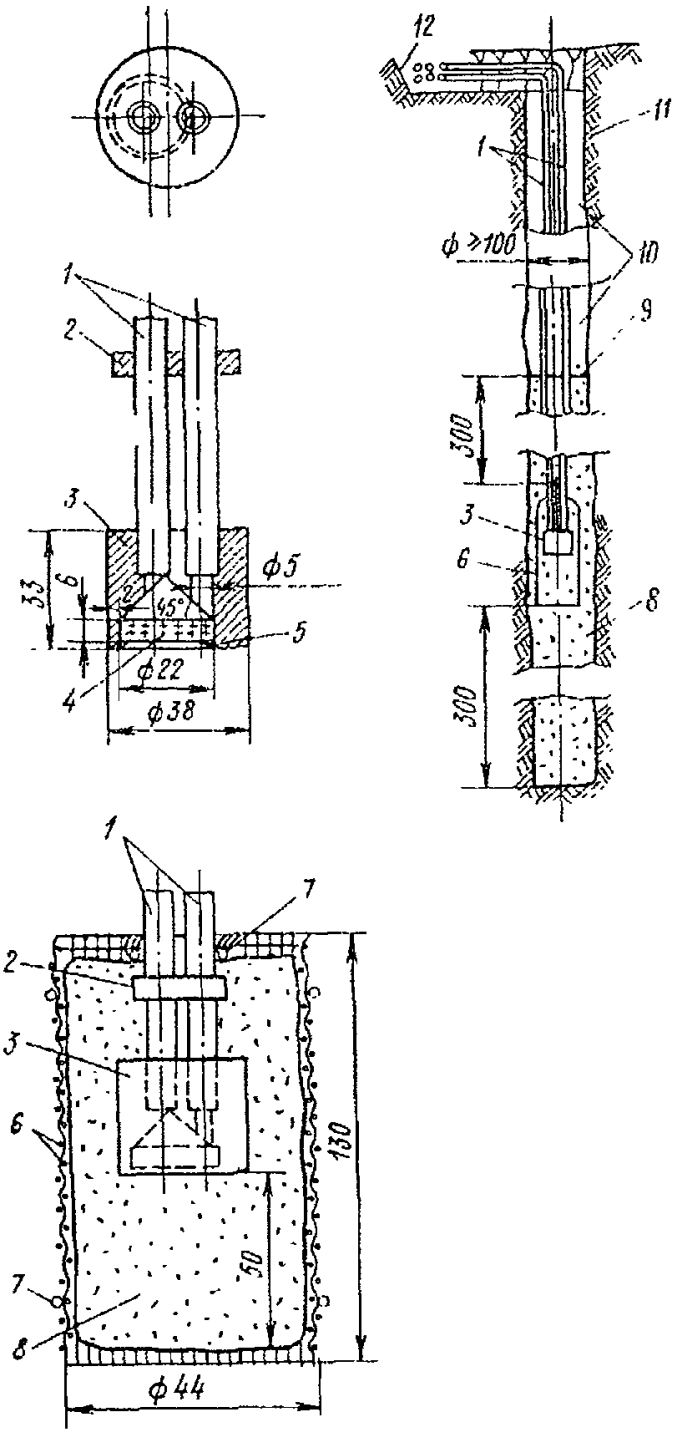


Рис. 5. Двухтрубный пьезометр системы Бюро мелиорации США. Тип для основания. Размеры, мм

а — водоприемник; *б* — установка водоприемника под подошвой сооружения; *в* — установка водоприемника в скважине; *1* — трубки из пластмассы с внешним диаметром 8 мм и толщиной стенки 1,6 мм; *2* — пластинка из пластмассы с размерами 25Х19Х6 мм, для скрепления трубок между собой; *3* — камера водоприемника из пластмассы; *4* — пористый диск; *5* — ребро камеры отгибается в нагретом состоянии для закрепления диска; *6* — сетка бронзовая; *7* — обвязка шнуром; 8 — песок чистый (промытый), увлажненный; *9* — верхняя граница засыпки песком; *10* — заполнение глиной; *11* — скважина; *12* — главная траншея, заполняемая песком.

Примечание. Перед закладкой водоприемника и засыпкой трубок проверить все стыки на герметичность при давлении воды 0,35 МПа.

3.29. Пьезодинамометр двухтрубный гидравлический

При низком коэффициенте фильтрации среды (породы, бетона), вмещающей водоприемники напорного пьезометра, обычные напорные пьезометры с одной трубой оказываются непри-

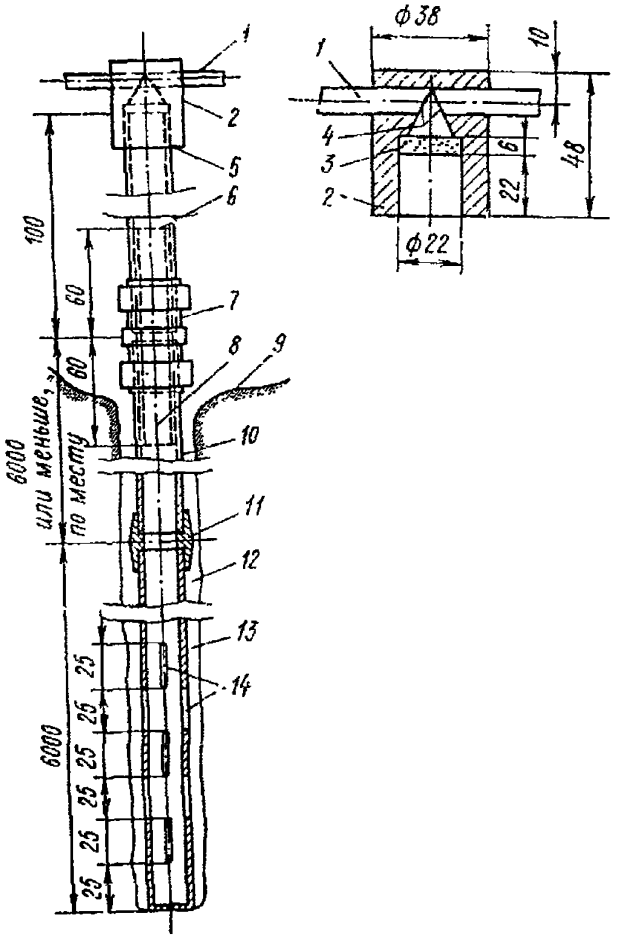


Рис. 6. Двухтрубный пьезометр системы Бюро мелиорации США с удлиненным водоприемником. Тип для оснований. Размеры, мм

1 — трубка из пластмассы с внешним диаметром 8 мм и толщиной стенки 1,6 мм; *2* — наконечник из пластмассы; *3* — пористый диск; *4* — линия обреза трубки, соответствующая поверхности конической полости; *5* — заклеенный стык (шов); *6* — втулка латунная длиной 120 мм, с внешним диаметром 16 мм и толщиной стенки 0,8 мм; *7* — муфта латунная; *8* — влажный, чистый песок, заполняющий трубу; *9* — контур выемки; *10* — труба из пластмассы с внешним диаметром 22 мм и толщиной стенки 3 мм; *11* — муфта соединительная из пластмассы; *12* — заполнение глиной; *13* — заполнение чистым песком; *14* — десять прорезей шириной по 1,5 мм и длиной по 25 мм.

Примечание. Перед засыпкой траншей с трубками проверить все стыки на герметичность при давлении 0,35 МПа.

годными (из-за малой чувствительности и большой инерционности) по причинам, проанализированным в работах [47, 48 и др.]. Кроме того, однотрубные пьезометры, имеющие в качестве водоприемника закладной струнный пьезодинамометр (не поддающийся замене потому, что его нельзя извлечь и заменить при трубе ломаного очертания), недостаточно долговечны. Как известно, срок службы струнных преобразователей, в частности, и пьезодинамометров струнного типа составляет 10 лет, реже до 15 лет, что значительно меньше срока службы гидротехнических сооружений. Принцип действия струнных преобразователей освещен в монографии [35] и других работах.

От недостатков, отмеченных выше, свободен двухтрубный точечный (закрытый) пьезометр. Его принцип действия следующий. В толщу грунта или бетона с целью измерения давления воды в порах этих сред (порового давления) закладывают водоприемник, представляющий собою полый элемент с проницаемыми стенками, в полость которого введены две гибкие трубки, показанные на рис 5, 6 (рис. 9 приложения 2); эти гибкие трубки служат, с одной стороны, для создания циркуляции воды, обеспечивающей удаление воздуха из измерительной системы, а с другой — для подключения водоприемника к манометру (рис. 7). Циркуляция создается насосом, прокачивающим воду по трубкам в водоприемник и отводящим ее из водоприемника в сборный бак у насоса (рис. 8). Прокачиваемая вода увлекает за собой воздух и выводит его из системы. Переключение трубок с линии насоса на линию манометров производят системой кранов (вентилей), смонтированных вместе с пружинными манометрами на общем щите. Добавочные вентили, показанные на рис. 9, служат для контроля герметичности и повышения надежности измерений напоров. Подробнее сведения о двухтрубных пьезометрах содержатся в [32], особенно в [48].

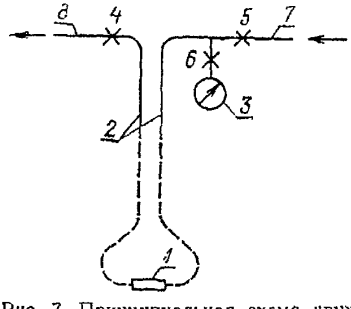


Рис. 7. Принципиальная схема двухтрубного пьезометра

1 — водоприемник; *2* — трубки диаметром 1/4 дюйма (6,3 мм); *3* — манометр пружинный (Бурдона); *4, 5, 6* — вентили; *7, 8* — трубки.

Пределы применимости двухтрубных пьезометров: щит с манометрами должен, как правило, располагаться не выше точек в которых заложены водоприемники пьезометров. В крайнем случае, хотя и нежелательно, щит можно установить с превышением не больше чем на 5—6 м над точками заложения водоприемников пьезометров. В этом случае вместо манометров ставятся мановакуумметры.

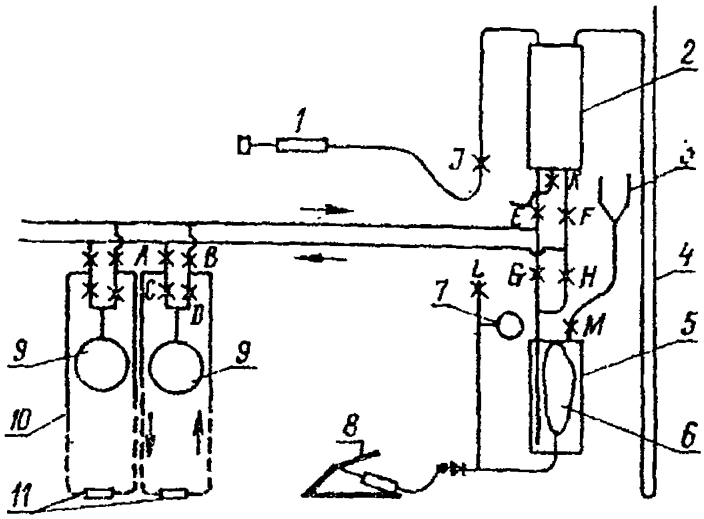


Рис. 8. Схема измерительных и вспомогательных устройств к двухтрубным пьезометрам

1 — ручной вакуумный насос; *2* — бак для возвратной воды; *3* — воронка для наливания воды в напорный бак; *4* — ртутный манометр; *5* — напорный бак; *6* — резиновый баллон; *7* — манометр; *8* — ножной воздушный насос; *9* — измерительные манометры Бурдона; *10* — полиэтиленовые трубки, диаметром 5 мм; *11* — водоприемники пьезометров; *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H*, *J*, *K*, *L*, *M* — вентили.

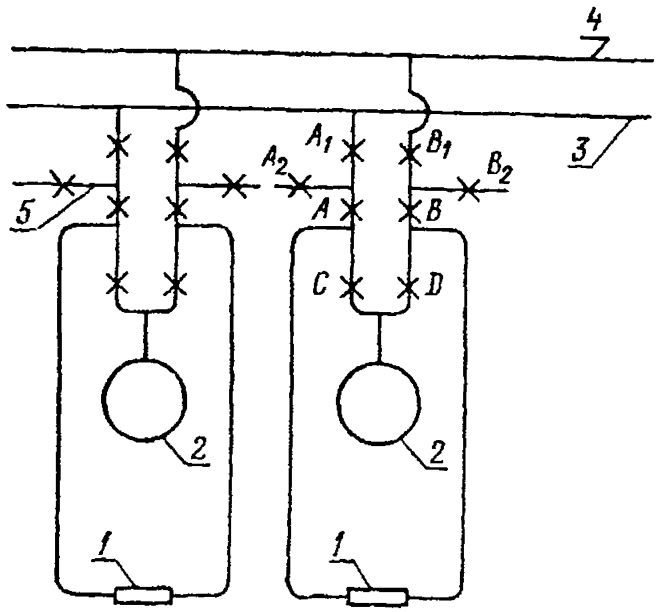


Рис. 9. Схема двухтрубных пьезометров с добавочными вентилями A_1, B_1, A_2, B_2

1 — водоприемники; *2* — манометры Бурдона; *3* — труба, подводящая воду под напором; *4* — труба, отводящая воду; *5* — патрубок выпускной.

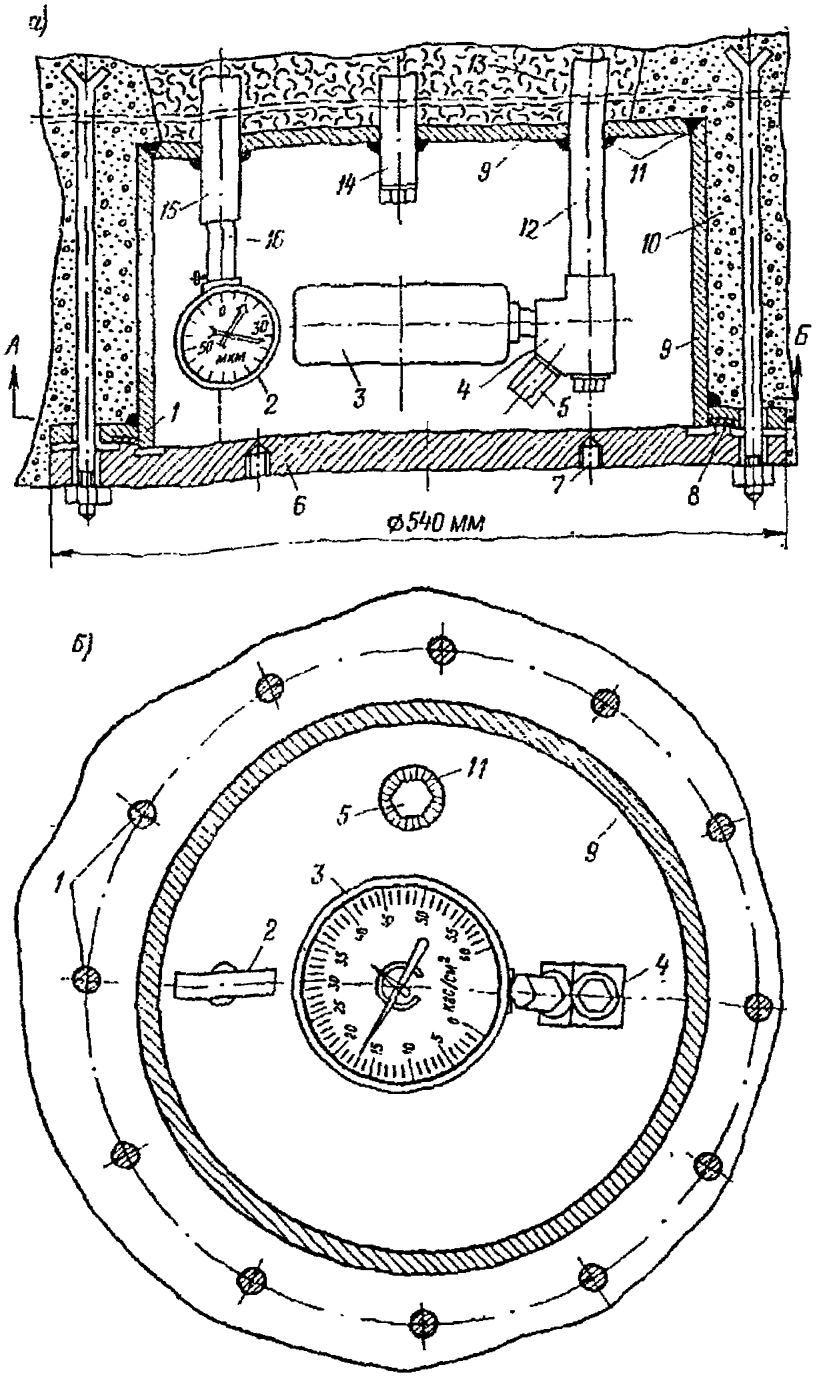


Рис. 10. Схема устройства герметической коробки с размещением в ней аппаратуры (КИА)

а — продольный разрез устройства; *б* — разрез по *АБ*; *1* — анкерный болт; *2* — индикатор; *3*— манометр; *4* — штуцер; *5* — пробка; *6* — крышка; *7* — отверстие для ключа; *8* — прокладка; *9* — корпус; *10* — бетон обделки; *11* — сварной шов; *12* — пьезометрическая труба; *13* — тампонажный раствор (безусадочный); *14* — инъекционная трубка; *15* — защитная трубка; *16* — штуцер мессуры.

Если нужно показания двухтрубных пьезометров передать от щита на центральный пульт, можно использовать в качестве струнных преобразователей давления воды пьезодинамометры, подведя к ним воду от тройника, установленного у подхода трубки, к манометру, аналогично тому, как это делается при установке пьезодинамометра на оголовке обычного однотрубного напорного пьезометра.

За рубежом двухтрубные пьезометры описанного типа имеют широкое распространение во многих странах на больших плотинах, особенно в США. В нашей стране они только начинают внедряться НИСом Гидропроекта в проекты контрольно-измерительной аппаратуры для больших плотин (Чарвакской, Нурекской и др.).

3.30. Максимальный пьезометр

Можно применить манометрические пьезометры с фиксацией на шкале пружинного манометра максимальных показаний (вторая стрелка без обратного хода) без передачи показаний на расстояние по трубам или кабелям. Для этого во время планового опорожнения туннеля устраивают в его обделке камеры, в которые закладывают металлические коробки со съемными

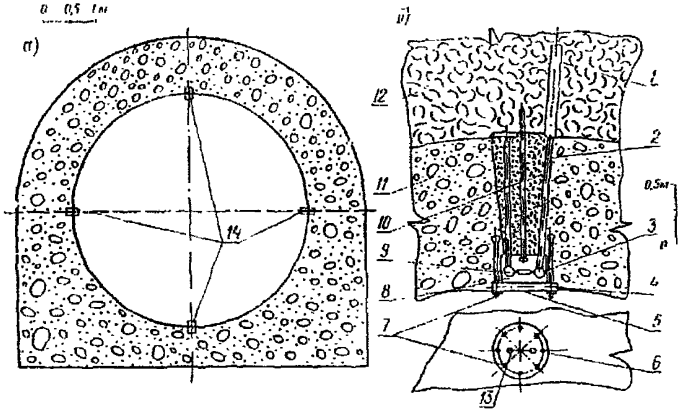


Рис. 11. Схема оснащения измерительного сечения туннеля

а — сечение туннеля; *б* — разрез измерительного устройства; *1* — пьезометр; *2* — тампонажный раствор; *3* — манометр; *4* — резиновая прокладка; *5* — крышка; *6* — вид на крышку снизу; *7* — болты; *8* — герметическая коробка; *9* — индикатор; *10* — инъекционная трубка; *11* — бетон обделки; *12* — скала; *13* — углубления для ключа; *14* — марки.

крышками, установленными герметично заподлицо с обтекаемой водой поверхностью обделки (рис. 10). Внутри камер устанавливают приборы (манометры и др.), снабженные вторыми стрелками, фиксирующими максимальные за период наблюдения значения измеряемых параметров (кроме напоров воды в точках на контакте обделки с породой и на разных расстояниях

от обделки внутри породы, например, напряжение в породе в этих точках, давление и температуру воды в туннеле и т. п.). Общий вид группы приборов, выведенных в такую герметичную камеру, показан на рис. 11.

Во время последующих опорожнений туннеля крышки снимают, фиксируют показания приборов, их максимальные указатели приводят к нулю и крышки вновь закрывают.

3.31. Манометры с вентилями, установленные на трубах пьезометров, расположенных внутри подземных сооружений (в туннелях, цементационных галереях и т. п.), часто оказываются поврежденными в процессе строительства. Поэтому следует сразу же устраивать соответствующие оградительные устройства — ниши с металлическими шкафами, закрываемыми замками. До осуществления ограждений можно пользоваться переносной колонкой, состоящей из трубки с манометром и вентилями; с помощью накидной гайки трубка этой колонки подсоединяется к трубе (снабженной резьбой) пьезометра, выведенной за обделку. Конструкция такой колонки для галерей в теле Ингурской арочной плотины разработана в ГрузНИИЭГСе.

3.32. Иногда применяют один манометр для нескольких пьезометров, производя при измерениях соответствующие переключения с помощью вентилей.

КОСВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

3.33. Если для разгрузки обделок напорных туннелей и шахт применен регулируемый дренаж, снабженный на выходе манометрами, то последний можно использовать для измерения давления подземной воды на обделку. Кроме того, по показаниям этих манометров можно судить о состоянии стальной облицовки водовода. Резкое возрастание давления в системе будет свидетельствовать о наличии утечек из водовода вследствие нарушения целостности облицовки.

Давление подземных вод на стальную облицовку подземного водовода можно определить путем дистанционного определения зазора между стальной облицовкой и бетоном. При этом необходимо учитывать конкретные размеры и конструкцию облицовки (ее толщину, наличие ребер жесткости и т. п.).

Для этой цели можно использовать, например, устройство показанное на рис. 12. Устройство снабжено датчиком давления и охватывающим коробку кожухом с отверстиями для сообщения образованной между ними полости с полостью измеряемого зазора, измерительный наконечник установлен с возможностью его перемещения в одном из отверстий кожуха, а датчик давления сообщен с полостью между коробкой и кожухом и связан с регистратором.

На рис. 12, *а* показана схема установки устройства, а на рис. 12, *б* — его конструкция.

Устройство состоит из кожуха, охватывающего распружиненную мембранную коробку, заполненную легкоподвижной

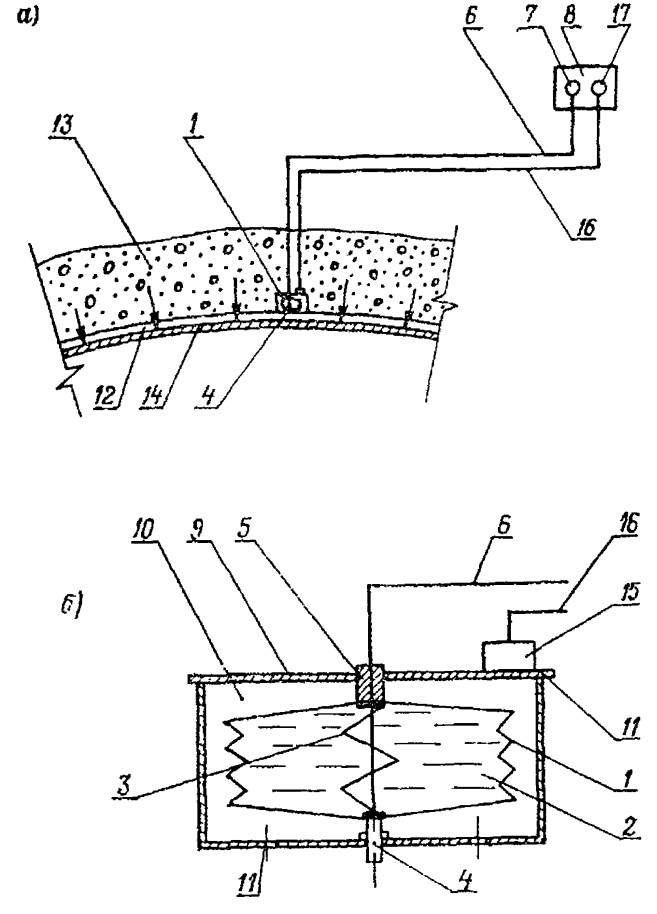


Рис. 12. Устройство для измерения зазоров

а — фрагмент обделки туннеля; *б* — прибор; *1* — герметичная коробка; *2* — толуол; *3* — пружина; *4* — измерительный наконечник; *5* — штуцер; *6* — капилляр; *7* — указатель зазора; *8* — измерительный пульт; *9* — кожух; *10* — полость кожуха; *11* — отверстия; *12* — зазор; *13* — бетонное кольцо; *14* — стальная оболочка; *15* — пьезодинамометр; *16* — проводник; *17* — указатель давления.

жидкостью, соединенного с коробкой измерительного наконечника датчика давления и регистратора, соединенного линиями связи, соответственно, с коробкой и датчиком давления. Кожух отверстиями сообщен с полостью контролируемого зазора. Датчик давления сообщен с внутренней полостью, образованной коробкой и кожухом.

При возведении подземного гидросооружения, например, водовода, состоящего из бетонного кольца и стальной оболочки, после монтажа стальной оболочки закрепляют на ней устройство для измерения зазоров и соединяют коробку и датчик с регистратором линиями связи. При этом измерительный наконечник касается стальной оболочки. После установки устройства оболочку бетонируют вместе с ним.

Перед установкой устройства в водоводе производят его тарировку в лабораторных условиях. В процессе эксплуатации водовода за счет естественного проникновения подземных вод внутрь кожуха происходит обжим коробки, а величина давления этих вод определяется с помощью датчика давления на регистраторе. Возможный естественный обжим коробки от подземных вод и давления воды внутри стальной оболочки учитывается при тарировке устройства. При опорожнении водовода и разгрузки его от внутреннего давления воды стальная оболочка водовода начинает деформироваться внутрь под действием подземных вод, и между стальной оболочкой и бетонным кольцом образуется зазор. В этот зазор под действием распружиненной коробки перемещается наконечник, контактирующий с оболочкой водовода. По деформации коробки за счет увеличения ее объема определяется величина зазора на регистраторе

Другой вариант дистанционного измерения зазора между бетоном обделки и стальной облицовкой возможен с помощью струнных датчиков — щелемера и пьезодинамометра. При этом струнный щелемер (тензометр) одним концом должен быть прикреплен к стальной облицовке водовода, а другим — к стержневому анкеру, заделанному в породу в точке, где деформации породы, вызванные водоводом, достаточно малы. Струнный пьезодинамометр (типа, служащего для измерения порового давления) следует установить в бетонной обделке водовода так, чтобы его водоприемная часть была расположена на контакте стальной облицовки с бетоном. Тогда струнный щелемер позволит непосредственно определить искомую величину, а пьезодинамометр, показывающий давление воды в щели, позволит установить зависимость между величиной зазора и давлением воды в нем. Эта зависимость при сравнении ее с соответствующей зависимостью, полученной с помощью устройства, показанного на рис. 12, заложенного по соседству, позволит оценить степень точности работы более простого устройства и послужит для повышения надежности измерений: в случае, если выйдет из строя один прибор, будет продолжать работать прибор, основанный на другом принципе.

3.34. Дополнительные рекомендации по закладке приборов и повышению надежности измерений.

Для контроля испытаний и исследований, выполняемых в водоводах и опытных камерах с опрессовкой водою, закладывают в ряде поперечников приборы различного назначения

(грунтовые и арматурные динамометры, тензометры и др.), а пьезометры (пьезодинамометры) обычно не закладывают. В этих случаях надлежит также предусматривать установку фильтрационной КИА.

3.35. Натурные исследования давления подземных вод в опытных камерах

Учитывая большое теоретическое и практическое значение оценки давления подземных вод на обделки подземных сооружений, в процессе изысканий и строительства следует проводить соответствующие натурные исследования в опытных камерах. Эти исследования целесообразно выполнять параллельно с опытами, проводимыми в камерах гидравлического загружения при определении деформативных характеристик породного массива.

При проведении опытов в камерах, давление подземных вод на обделку можно определять с помощью точечных пьезометров или пьезодинамометров, водоприемники которых расположены на контакте обделки с породой. При этом водоприемник пьезодинамометра имеет конструкцию, не реагирующую на давление примыкающего грунта [33].

С целью комплексного изучения в опытных камерах величин давления подземных вод, проницаемости бетонной обделки, прочности породного массива и эффективности противофильтрационной цементации рекомендуется следующая методика организации и проведения исследования в опытных камерах с применением системы расположения по радиальным лучам в поперечных сечениях точечных пьезометров.

3.36. Оборудование опытной камеры

Под точечными подразумевают такие пьезометры, у которых водоприемная часть (фильтр) имеет длину l, небольшую по сравнению с толщиной обделки, толщиной зоны цементации и радиальным расстоянием между соседними пьезометрами, расположенными на луче.

При мелкоблочной структуре породы следует принимать $l = 0{,}4 \div 0{,}6$ м; при крупноблочной структуре породы и значительной толщине зоны цементации $l = 0{,}8 \div 1{,}2$ м.

Пьезометры следует располагать вдоль каждого луча по четыре штуки (рис. 13) так, чтобы середина его фильтра (т. е. середина водоприемной части — участка длиной l скважины с диаметром $d = 2r$) располагалась у первого пьезометра на расстоянии $0{,}5l$ от контакта породы с обделкой, у второго — по середине проектной толщины (c) зоны цементации, у третьего — на внешней границе проектной зоны цементации, у четвертого — вне зоны цементации на расстоянии $0{,}5c$ от ее внешней границы.

Для создания фильтров пробуривают из туннеля соответствующие скважины с $d \cong 50$ мм, которые за пределами концевых участков длиной l тампонируют, а воду из фильтров выводят по

трубам на измерительный щит, установленный в подходной выработке. Выводящие стальные оцинкованные трубы диаметром 25 мм пропущены герметично через тело пробки.

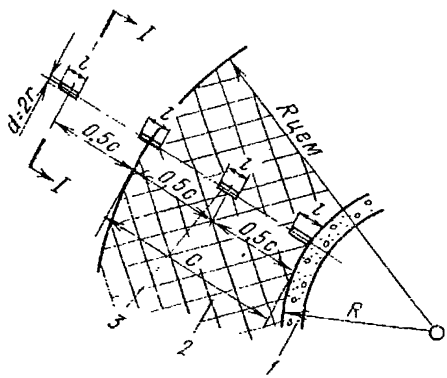


Рис. 13. Схема расположения пьезометров вдоль луча

1 — бетонная обделка туннеля; *2* — противофильтрационная цементация; *3* — фильтр (водоприемный участок) пьезометра.

Водоприемную часть пьезометров — фильтр устраивают так, чтобы предупредить возможность выноса частиц породы и заполнителя трещин в породе в случае недостаточной суффозионной прочности заполнителя. Полость между стенками скважины и выводящей трубой пьезометра, находящуюся за пределами фильтра между стенками скважины и выводной трубой, герметично тампонируют, иначе пьезометр не будет точечным и покажет осредненный напор на участке скважины неопределенной длины.

С целью удешевления можно взамен отдельных пьезометров, устанавливаемых вблизи одного луча применить пьезометр (рис.13) с несколькими водоприемниками (фильтрами), находящимися в единой скважине, пробуренной вдоль данного луча

Измерительный щит, упомянутый в предыдущем пункте представлен на рис. 14, где с целью упрощения рисунка изображено подключение только двух пьезометров *1*. Аналогично должны быть подключены к вакуумному *6* и напорному *7* бачкам все остальные пьезометры (не показанные на этом рисунке)

Целесообразно группу пьезометрических одиночных скважин принадлежащих одному лучу, располагать равномерно по направляющим цилиндрической поверхности с радиусом $R_п \cong$ $\cong 0{,}5 \div 1$ м, имеющей осью этот луч (рис. 15).

При породе, изотропной по водопроницаемости, а также слоистой, когда слои расположены приблизительно нормально

по отношению к оси опытной камеры, следует, как минимум, применить двухлучевую схему расположения пьезометров (рис 16, *а*), а более желательно — трехлучевую (рис. 16, *б*).

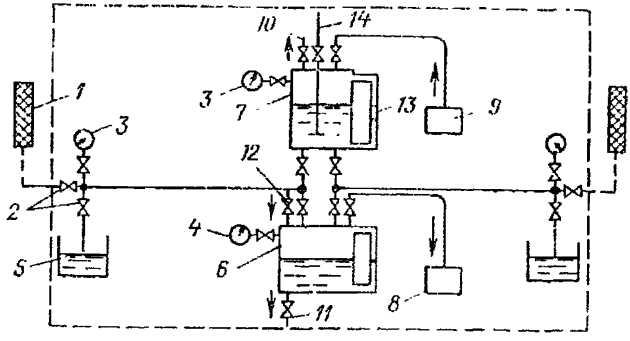


Рис. 14. Принципиальная схема устройств измерительного щита пьезометров, установленных в рабочем отсеке

1 — водоприемная часть (фильтр) пьезометра; *2* — вентили; *3* — манометр пружинный; *4* — вакуумметр пружинный; *5* — сосуд для измерения расхода воды; *6* — бак герметический с вакуумом; *7* — бак напорный; *8* — вакуумнасос с электродвигателем; *9* — компрессор с электродвигателем; *10* — патрубок для выпуска воздуха; *11* — патрубок для слива воды; *12* — патрубок для впуска воздуха; *13* — трубка со шкалой определения объема воды в бак; *14* — патрубок для подачи воды от водопроводной сети или водяного насоса.

При произвольном направлении (не по нормали) оси опытной камеры по отношению к напластованию породы, анизотропной по проницаемости, следует лучи с пьезометрами располагать с учетом направления главных осей анизотропии. Именно, при двухлучевой схеме направлять лучи вверх под углом 45° к направлению той из главных осей анизотропии, которая расположена ближе к вертикали; более желательно применить четырехлучевую схему, добавив к упомянутым двум лучам еще два луча с прямо противоположным направлением.

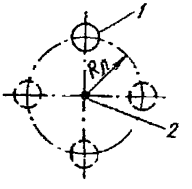


Рис. 15. Сечение по *I—I* (рис. 13)

1 — поперечное сечение пьезометрических скважин; *2* — след луча.

При расположении оси опытной камеры под углом к напластованию породы целесообразно бурить скважины для фильтров не под прямым углом к оси камеры, а выбирать угол так, чтобы фильтр пьезометра пересек наибольшее число трещин напластования. В последнем случае длину фильтра следует увеличить настолько, чтобы проекция этой длины на плоскость поперечного сечения камеры равнялась бы заданной величине *l*.

В створе точечных пьезометров или вблизи от него (на расстоянии нескольких метров) следует устроить вертикальную пьезометрическую скважину с длиной фильтра $3l$ и с расположением фильтра над сводом камеры на высоте, примерно, не меньшей $(7 \div 10)l$, но не превосходящей отметку уровня подземных

вод. Труба от этого пьезометра также должна быть выведена через пробку камеры на щит и снабжена манометром. Назначение этого пьезометра — определять напор подземных вод в зоне, маловозмущенной воздействием туннеля.

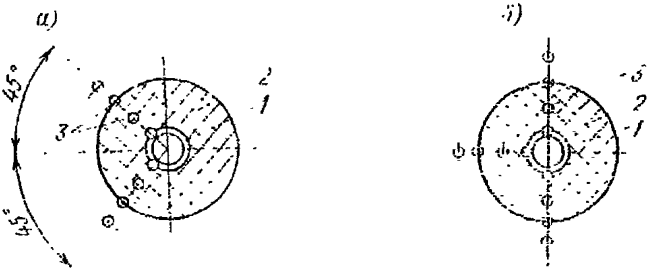


Рис. 16. Схема расположения пьезометров в случае породы, изотропной по водопроницаемости, или при расположении слоев породы нормально к оси туннеля

а — двухлучевая схема; *б* — трехлучевая схема; *1* — обделка туннеля; *2* — зона цементации; *3* — фильтры пьезометров.

При числе створов с точечными пьезометрическими скважинами, равном единице, створ следует расположить в середине длины опытной камеры, а при числе створов, равном двум (что более желательно), створы следует расположить на расстоянии по 1/3 длины камеры от ее концов.

При двух пьезометрических створах с расположением в каждом трех лучей по четыре пьезометра на луче (рис. 16, *б*) работают 24 точечных пьезометра.

Работы по бурению скважин для пьезометров и установку в скважины фильтров выполняют после окончания работ по цементации (заполнительной, укрепительной — противофильтрационной), во избежание повреждения фильтров (разрыва сетки фильтра, забивки его затекающим цементным раствором).

Если опытная камера должна исследоваться в две очереди — до и после цементации породы, — то после выполнения исследований первой очереди фильтры всех пьезометров заглушаются (тампонируются). После окончания цементационных работ по соседству с заглушенными фильтрами (в расстоянии 1—2 м) разбуривают новые скважины, устанавливают в них новые фильтры и подсоединяют их к пьезометрическим трубам измерительного щита, использованным в исследованиях первой очереди.

3.37. Методика и техника проведения исследований

Перед опрессовкой опытной камеры полости всех «точечных» пьезометров сперва освобождают от воздуха путем вакуумирования с помощью устройств, находящихся на измерительном щите (рис. 14), а затем заполняют водой под соответствующим давлением из бака 7.

Если вокруг камеры имеются напорные подземные воды, то манипулируя вентилями, определяют по манометрам напоры в точечных пьезометрах ($h_п$) в метрах водяного столба, фиксируя при этом продолжительность времени стабилизации показаний пьезометров. Для отсчета всех напоров в качестве нулевой плоскости удобно принять горизонтальную плоскость, проходящую через центр среднего сечения опытной камеры. Тогда пьезометрические уровни, расположенные выше нулевой плоскости, будут характеризоваться положительными напорами, а расположенные ниже нулевой плоскости — отрицательными.

С целью проверки чувствительности и инерционности (времени стабилизации показаний) каждого пьезометра выпускают из него воду до начала опытов с опрессовкой камеры, измеряют объемным способом (с помощью мерного сосуда 5 и хронометра — рис. 14) расход воды из пьезометра и фиксируют величину этого расхода ко времени его практической стабилизации.

Зная величины $h_п$, $Q_п$, можно определить величину k — коэффициента фильтрации породы, вмещающей фильтр пьезометра.

Аналогичное определение величин k целесообразно повторить после окончания опытов с опрессовкой при опорожненной камере, чтобы определить, насколько увеличилась величина k из-за остаточных деформаций породы, вызванных ее опрессовкой.

Если вокруг камеры отсутствуют напорные подземные воды, то взамен рассмотренного выше выпуска воды из пьезометров нагнетают в них воду под напором $h_п$, фиксируя нагнетаемый расход $Q_п$ к моменту практической стабилизации его величины.

По измеренным величинам $h_п$ и $Q_п$ определяют коэффициент фильтрации k породы.

В процессе испытания опытной камеры при каждой ступени давления (p) фиксируют величины расхода $Q_{фк}$ нагнетаемой в нее воды и напоров всех пьезометров (h_1, h_2, h_3, h_4) к моменту практической стабилизации значений упомянутых параметров. Их фиксацию производят как при увеличении p, так и при уменьшении.

3.38. Методика обработки опытных данных

Для предварительной оценки коэффициента фильтрации k породы или зацементированной зоны его величину определяют по следующим приближенным формулам.

При наличии напорных подземных вод [49]:

$$k = \frac{Q_п}{2\pi l (h_п - h_0)} \ln \frac{\alpha l}{r}. \qquad (1)$$

Здесь $h_п - h_0$ — разность между напором в закрытом пьезометре (перед началом выпуска из него воды, т. е. при $Q_п = 0$) и напором в конце его трубы, из которой выпускают расход $Q_п$; α — безразмерный коэффициент; $\alpha = 1{,}32$ при фильтре, примыкающем к обделке [49, 50]; $\alpha = 0{,}66$ при фильтре, не примыкающем к обделке [50; 51, с. 31].

При отсутствии напорных подземных вод, при полевом определении водопроницаемости нагнетанием воды в скважину можно принять:

$$k = q, \tag{2}$$

если выражать k в м/сут, а удельное водопоглощение в л/мин · м^2.

$$q = \frac{Q_п}{l(h_п - h)}. \tag{3}$$

В последней формуле нагнетаемый в фильтр расход $Q_п$ выражен в л/мин;.

l — длина фильтра (водоприемника) пьезометра, м; $h_п - h$ — превышение напора на поверхности фильтра над его низшей точкой, м.

Таким образом, пьезометры можно использовать не только по их прямому назначению, но еще и для определения коэффициентов фильтрации породы в близкой окрестности фильтра — примерно в зоне, заключенной внутри поверхности, точки которой удалены на расстояние l от поверхности фильтра [53].

Приведенными в этом пункте формулами можно пользоваться и для контроля качества и размеров зоны цементации путем нагнетания воды в скважины во время устройства опытной камеры.

Более точную оценку осредненной величины k в породе и зоне цементации, а также в самой бетонной обделке опытной камеры, можно сделать по нижеследующим формулам.

Определив по показаниям манометров напоры (м вод. ст. в точечных пьезометрах h_1, h_2, h_3, h_4), строят вдоль каждого луча эпюру напоров в радиальном направлении (рис. 17).

За окончательную для данного поперечника принимают осредненную эпюру, полученную как среднеарифметическое из эпюр вдоль лучей, лежащих в этом поперечнике.

Будем пользоваться величиной Q_1, выражающей отношение фильтрационного расхода из камеры в породу (при установившейся фильтрации) $Q_{фк}$ к единице длины L камеры:

$$Q_1 = \frac{Q_{фк}}{L}. \tag{4}$$

Расход $Q_{фк}$ измеряют при напоре воды внутри опытной камеры:

$$h_0 = \frac{p}{\gamma}, \tag{5}$$

где p — давление воды в камере; γ — вес единицы объема воды.

Примем приближенно, что фильтрационный поток плоский, радиальный; можно считать приложимой для такого потока известную формулу осесимметричного движения. Применим ее последовательно к круглоцилиндрическим соосным слоям (рис. 17): к бетонной обделке с радиусом внутренним и внешним соответственно R_0 и R; к зацементированной породе в пределах

от R до $R+0{,}5c$; от $R+0{,}5c$ до $R+c$; к незацементированной (точнее говоря, слабее зацементированной) породе в пределах от $R+c$ до $R+1{,}5c$; к остальной зоне породы в пределах от контура окружности с радиусом $R+1{,}5c$ до внешнего контура области фильтрации, которой принимают в виде цилиндрической поверхности с расчетным радиусом:

$$R_e = \beta t \qquad (6)$$

и напором h_e на поверхности,

где t — глубина заложения оси камеры под уровень подземных вод при отсутствии сверху водоема, при этом $\beta = 0{,}5$; а при наличии водоема t — глубина заложения оси камеры под дно водоема, при этом $\beta = 22$.

Тогда будем иметь соответственно следующие выражения для коэффициентов фильтрации:

в бетонной обделке

$$k_б = \frac{Q_1}{2\pi (h_1 - h_0)} \ln \frac{R}{R_0}; \qquad (7)$$

в породе

$$k_{12} = \frac{Q_1}{2\pi (h_2 - h_1)} \ln \frac{R + 0{,}5c}{R}. \qquad (8)$$

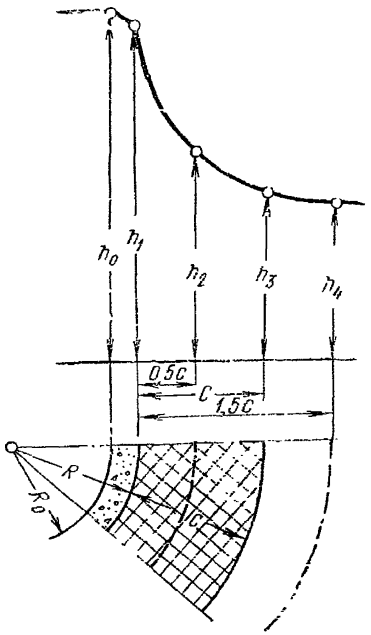


Рис. 17. Эпюра напоров в радиальной плоскости при фильтрации воды из туннеля.

$$k_{23} = \frac{Q_1}{2\pi (h_3 - h_2)} \ln \frac{R + c}{R + 0{,}5c}, \qquad (9)$$

$$k_{34} = \frac{Q_1}{2\pi (h_4 - h_3)} \ln \frac{R + 1{,}5c}{R + c}, \qquad (10)$$

$$k_{4e} = \frac{Q_1}{2\pi (h_e - h_4)} \ln \frac{R_e}{R + 1{,}5c}. \qquad (11)$$

Последняя формула применима при условии:

$$t \gg R + 1{,}5c,$$

причем точность формулы тем больше, чем ближе фильтрационный поток к плоскому (двухмерному), т. е. чем больше отношение длины опрессовываемой опытной камеры к ее диаметру.

При отсутствии напорных подземных вод вместо (11) имеем уравнение [23, с. 34; 54, с. 44]:

$$h_4 = \frac{Q_1}{6{,}70k_п} \ln \frac{0{,}34Q_1}{k_п(R + 1{,}5c)}, \qquad (12)$$

где h_4 — напор на цилиндрической поверхности с радиусом $R+1{,}5c$; $k_п$ — коэффициент фильтрации породы в пределах между этой поверхностью и поверхностью бугра, образованного фильтрационным потоком из опытной камеры в окружающую среду.

Из уравнения (12) величину $k_п$ определяют подбором, подставляя в правую часть различные произвольно принятые числовые значения k до тех пор, пока правая часть не совпадет с величиной h_4, взятой по эпюре напоров (рис. 17).

Высоту a верхней точки бугра фильтрационного потока над осью камеры определяют по формуле [23]:

$$a = 0{,}216Q_1/k_п. \qquad (13)$$

Определив с помощью нагнетания воды в опытную камеру коэффициенты фильтрации бетонной обделки $k_б$, зацементированной породы $k_{цем}$ и незацементированной породы k, подсчитывают по известным формулам [22, 52, 54] фильтрационный расход натурного (проектируемого) напорного сооружения (туннеля, шахты) и напоры на поверхности контакта обделки с зацементированной породой (при наличии глубокой цементации) и на внешней расчетной поверхности зоны цементации.

Если результаты испытания опытной камеры выявят ощутимое непостоянство величин коэффициентов фильтрации в радиальном направлении, то это следует учесть при расчетах. Для этого можно воспользоваться следующей формулой, позволяющей в пределах каждого цилиндрического слоя учесть изменение коэффициентов фильтрации в радиальном направлении (для упрощения расчета при выводе формулы (14) это изменение принимается от k_1 до k_2 по линейному закону):

$$\frac{h_1 - h_2}{Q_1} = \frac{R_2 - R_1}{2\pi(k_1R_2 - k_2R_1)} \ln \frac{R_2k_1}{R_1k_2}. \qquad (14)$$

Здесь k_1 и k_2 — коэффициенты фильтрации соответственно на соосных цилиндрических поверхностях с радиусом R_1 и R_2 (при этом принимается, что внутри цилиндрического слоя коэффициент фильтрации k с увеличением радиуса от R_1 до R_2 изменяется по линейному закону от k_1 до k_2); h_1 и h_2 — напоры на цилиндрических поверхностях с радиусами R_1 и R_2; Q_1 — фильтрационный расход через единицу длины цилиндрического (кольцевого) слоя причем движение воды через этот слой предполагается напорным и осесимметричным.

Правая часть зависимости (14) выражает фильтрационное сопротивление единицы длины упомянутого выше слоя. Если просуммировать это сопротивление со всеми остальными сопротивлениями, через которые последовательно проходит фильтрационный поток, получим уравнение, в котором правая часть выражает полное сопротивление, а левая часть — полный перепад напора, деленный на расход Q_1.

Из этого уравнения, зная полный перепад напора и полное сопротивление, определяют Q_1. Затем, подставляя найденную величину Q_1 в исходные уравнения для отдельных слоев, определяют потери напора в этих слоях, а следовательно, и интересующие нас напоры на характерных цилиндрических поверхностях (обделка — порода, внешняя поверхность расчетной зоны цементации и т. д.).

Все приведенные выше формулы составлены для фильтрационного потока, подчиняющегося линейному закону сопротивления (закону Дарси).

3.39. Дополнительные рекомендации по оборудованию опытной камеры и исследованиям в ней

Рекомендации, предложенные выше в отношении фильтрационных исследований в опытных камерах, являются минимальными.

Ценность результатов испытания опрессовкой опытных камер, очевидно, значительно возрастет (при относительно незначительном увеличении затрат труда, материалов и оборудования), если расширить задачи исследования, включив в их число определение количества и размеров трещин в обделке при разных ступенях давления во время опрессовки с циклами увеличения и уменьшения давления воды и др.

Для расширения диапазона давления подземных вод во время проведения опытов при снижении затрат на их выполнение можно применить способ создания регулируемого давления на обделку опытной камеры искусственных подземных вод.

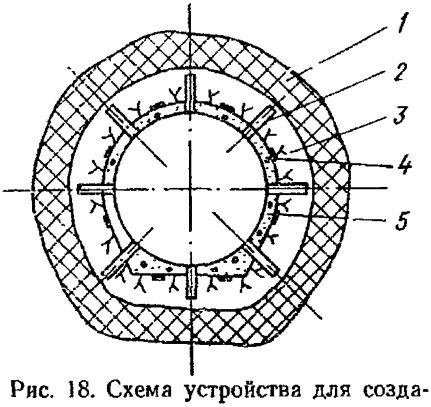


Рис. 18. Схема устройства для создания регулируемого давления искусственных подземных вод на обделку опытной камеры

1 — зона противофильтрационной цементации; *2* — скважины для нагнетания воды в целик; *3* — целик незацементированной (менее зацементированной) породы; *4* — датчики давления воды (порового давления); *5* — обделка опытной камеры.

В этом случае опытную камеру устраивают с противофильтрационной цементацией породы (экраном), расположенной вокруг выработки, с оставлением между обделкой и цементацией незацементированного (менее зацементированного) дренирующего целика породы (рис. 18). В целик породы нагнетают через систему скважин (радиальных или параллельных оси камеры) воду под заданным напором, имитирующую подземные воды. В этой же камере можно испытывать обделки на водопроницаемость и на прочность и устойчивость под действием давления искусственных подземных вод

при порожней камере. Условия работы обделки и режим подземных вод в этом случае максимально приближается к реальным эксплуатационным условиям. При отсутствии противофильтрационного экрана вокруг опытной камеры загрузить обделку расчетным давлением искусственных подземных вод практически нельзя.

Возможность испытания в такой камере различных новых типов обделок на большие нагрузки от давления подземных вод приобретает особо важное значение в связи с интенсивным развитием строительства высоконапорных подземных сооружений ГЭС и ГАЭС.

3.40. Давление подземных вод на бетонную обделку зависит от ее водопроницаемости. Известно, что учет водопроницаемости бетонной обделки может дать практически ощутимое уменьшение давления подземных вод на обделку, если соотношение коэффициентов фильтрации обделки и массива пород будет приблизительно равно или больше 0,003 [52, 55]. Поэтому целесообразно при проведении исследований в опытной камере определять общую водопроницаемость бетонной обделки с помощью формулы (7) по измеренным величинам h_1, Q_1, а также определять местную водопроницаемость бетонной обделки путем закладки в нее фильтров (рис. 1 приложения 5).

Натурные наблюдения за давлением подземных вод в период эксплуатации

3.41. В период эксплуатации наблюдение за давлением подземных вод на элементы обделок и на противофильтрационную цементацию осуществляют в основном с помощью пьезометров обычных (однотрубных) или двухтрубных (при низкой водопроницаемости вмещающей среды), снабженных пружинными манометрами, а при значительных расстояниях между пьезометрами — с помощью закладных струнных пьезодинамометров.

3.42. При наличии в туннелях или шахтах шпурового дренажа эффективность работы последнего по снижению давления подземных вод на обделку можно определять по методике, примененной в отводящем туннеле Севанской ГЭС [55]. Опытный участок длиной 16 м туннеля диаметром 6 м был дренирован шпурами, расположенными в четырех поперечниках. В каждой поперечнике было заложено по четыре шпура диаметром 40 мм и длиной по 4 м. Давление посередине между шпурами вблизи обделки туннеля замеряли с помощью манометров, установленных на коротких трубках с торцовым отверстием, заложенных породу через обделку. Расход воды, поступавшей через шпуры определяли объемным способом.

Проведенные исследования показали следующее:

сниженные напоры посередине между осями соседних работающих шпуров составляют 15 — 20% действующего на туннель гидростатического напора;

основной фильтрационный поток к туннелю перехватывается верхними и боковыми шпурами;

время стабилизации режима притока фильтрационной воды к туннелю (расходов и напоров воды) составляет 7 — 8 ч.

Если в напорных туннелях и шахтах применен регулируемый дренаж, то при помощи вентилей и манометров, установленных на выходе из дренажа, можно проводить измерение напоров и расходов фильтрационных вод.

3.43. При быстром опорожнении высоконапорных туннелей и шахт возможно повреждение их бетонных обделок от значительных гидродинамических сил, вызванных неуравновешенным давлением поровой воды в бетоне обделки [52]. В связи с этим после опорожнения высоконапорных подземных водоводов с бетонной (железобетонной) обделкой необходимо тщательно осматривать их поверхность и в случае обнаружения шелушения бетона выяснить причину его возникновения и дать предложения по ограничению скорости опорожнения водовода.

3.44. При глубоком заложении подземного сооружения под уровень подземных вод нагрузка от их воздействия достигает значительных размеров, поэтому очень ценно накопление фактического материала для последующего обоснования возможности и степени снижения расчетного значения коэффициента α_2.

Существующие методы определения давления подземных вод с помощью пьезодинамометров и пьезометров, расставленных без учета локальной трещиноватости породы, не позволяют проследить за изменениями давления подземных вод на небольшой площадке контакта бетон — порода.

Для получения таких сведений расстановку датчиков измерительных приборов рекомендуется выполнять следующим образом [55]. После проходки выработки подземного сооружения, совместно с геологами выбирают характерные в фильтрационном отношении участки, назначают на них опытные площадки. Тщательно документируют трещиноватость на опытных площадках и составляют схему размещения на них датчиков контрольно-измерительной аппаратуры. При этом датчики располагают над трещинами, над монолитными (сплошными) участками и в промежутках между ними (рис. 19). Каждый датчик нумеруют и соединяют с пультом. Частота расположения датчиков зависит от трещиноватости и проницаемости породы.

Измерение давления подземных вод производят как в период неустановившегося, так и установившегося режима фильтрации.

Мероприятия по снижению давления подземных вод

3.45. В большинстве случаев желательно, чтобы давление подземных вод на обделки было как можно меньше. Это увеличивает долговечность обделки, улучшает условия эксплуатации (если помещение сухое, например, подземный машзал), повы-

шает запас прочности и устойчивости обделки, если нагрузкой, определившей ее размеры и конструкцию, явилось давление подземных вод.

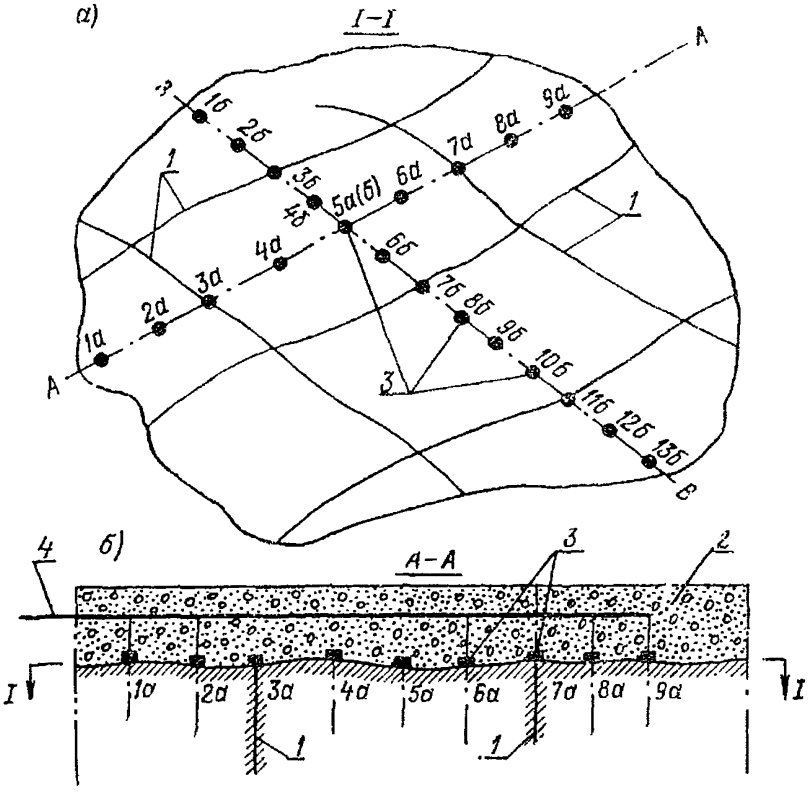


Рис. 19. Схема расположения датчиков давления подземных вод
а — план по *I — I*; *б* — разрез по створу *А—А*; *1* — трещины в породе; *2* — обделка; *3* — датчики давления; *4* — выводы от датчиков к пульту.

Однако бывают случаи, когда значительное давление подземных вод выгодно для работы обделки сооружения, например для напорного подземного водовода с бетонной обделкой кругового очертания. Тогда, если наименьшее (в течение времени эксплуатации водовода) давление подземных вод на обделку $p_{мин}$ будет мало отличаться от расчетного давления воды внутри водовода (или будет превосходить величину p даже значительно), то давления $p_{мин}$ и p как действующие на обделку в прямо противоположных направлениях будут в той или иной мере взаимно компенсироваться. Благодаря этому растягивающие напряжения в обделке снизятся, что позволит облег-

чить конструкцию обделки, исключить образование в ней трещин или уменьшить их толщину.

3.46. Если в процессе эксплуатации будет установлено наличие давления подземных вод выше проектного их значения или выявлена необходимость снижения давления подземных вод вообще, то для этих целей можно использовать следующие способы и устройства, применяемые с учетом конкретных инженерно-геологических и гидрогеологических условий, компоновки и конструкции сооружения, его назначения, режима работы и ряда других факторов.

1. Устройство дренажа, если последний не был предусмотрен проектом. При проектировании дренажа следует руководствоваться «Указаниями» [52].

2. Восстановление дренажа, если он был засорен в процессе строительства.

3. Очистка дренажа в случае его зарастания в результате механической и химической суффозии в породе и бетоне.

4. Дополнительное устройство дренажей.

5. Интенсификация работы закрытого регулируемого дренажа путем открытия выпускаемых задвижек.

6. Устройство противофильтрационных завес, например, цементационных. При этом, чтобы не снизить разгрузочную эффективность приобделочного дренажа (шпурового, ленточного и т. д.), целесообразно зону цементации располагать на расстоянии от обделки так, чтобы между обделкой и зоной цементации оставался слой незацементированной (или слабозацементированной) породы толщиной несколько метров.

7. Усиление обделки в случае невозможности устройства противофильтрационной завесы.

8. Сработка водохранилища.

9. Ремонт обделки водопроводящих сооружений, если они являются источниками подпитки подземных вод.

10. Отвод поверхностных водотоков или гидроизоляция их русла.

3.47. Учет наличия в обделке сквозных трещин дает возможность ощутимо снизить расчетное значение давления подземных вод. При этом следует иметь в виду, что при одних и тех же значениях раскрытия трещин их разгружающий эффект зависит от коэффициента фильтрации породы.

4. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПРИТОКОМ ВОДЫ В ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

4.1. Приток подземных вод в подземные сооружения может быть предусмотренным и непредвиденным.

Источником предусмотренного притока воды являются швы в бетонных и железобетонных обделках, дренажные устройства

с выпуском воды внутрь сооружения и необлицованные поверхности выработок, пройденных в прочных водоустойчивых невыветривающихся скальных породах.

Непредвиденный приток в подземные сооружения имеет место, когда подземные воды поступают через непредусмотренные в проекте трещины в обделках, через дефекты бетонирования обделок, строительные швы, незаделанные цементационные отверстия в бетонных обделках и стальных облицовках водоводов через разрушенные участки обделок, незабетонированные подходные выработки и т. п.

Непредвиденный приток в подземные сооружения может достигать существенных значений и приводить к потерям воды из водохранилища, химической и механической суффозии в бетоне обделок и в горном массиве, осложнять эксплуатацию оборудования и т. п. (приложение 4).

4.2. Поступившие в подземные сооружения подземные воды необходимо с наименьшими затратами вывести за пределы сооружения.

В общем случае профильтровавшуюся в дренажи воду можно отводить внутрь водопроводящего сооружения или в нижерасположенный туннель, самотеком на дневную поверхность, в нижерасположенные водопроницаемые водоносные пласты, откачкой насосами.

Общими требованиями к водоотводящим системам дренажа являются возможность их осмотра и очистки и недопустимость выпадания в них частиц, вымываемых из окружающей туннель породы, а также зарастания продуктами выщелачивания цемента обделок.

4.3. Дренажную воду внутрь гидротехнических туннелей или шахт можно выпускать при следующих условиях:

внутренний напор воды в туннеле не превышает минимального напора подземных вод, в противном случае выпуски оборудуют обратными клапанами, препятствующими просачиванию воды из водовода в породу;

отсутствует опасность загрязнения транспортируемой по туннелю воды вредными продуктами выщелачивания горных пород

не опасна передача в дренаж пульсационного давления потока воды в туннеле;

не опасно замерзание дренажной воды в туннеле.

Отвод дренажной воды внутрь напорных туннелей и шахт осуществляется по бесклапанной и клапанной схеме.

Первую схему принимают в тех случаях, когда напор подземных вод превышает внутренний напор воды в водоводе, как это было, например, на Теребля-Рикской ГЭС (приложение 4)

Вторую схему применяют, как правило, в водоводах со стальными облицовками, внутренний напор в которых в период нормальной эксплуатации превышает напор подземных вод.

Система отвода дренажных вод может быть нерегулируемой и регулируемой.

ОБЪЕКТЫ НАБЛЮДЕНИЯ

4.4. В комплекс натурных наблюдений, связанных с притоком воды в подземные сооружения, входят:

наблюдение за водопроявлениями;

измерение величины фильтрационного расхода в отдельных источниках, группы источников и по сооружению в целом (в увязке с работой водохранилища, соседних выработок, временем года, а также с увязкой работ по созданию противофильтрационных элементов и таких мероприятий, как включение или выключение дренажей);

наблюдения за работой дренажей;

наблюдения за состоянием дренажных выпусков и системы водоотвода;

проведение специальных исследований по уточнению водопроницаемости породного массива, вмещающего сооружение, и по определению водопроницаемости бетонных обделок и зон зацементированной породы;

наблюдения за процессами механической и химической суффозии и кольматажа.

Способы и устройства для наблюдения за притоком подземных вод

4.5. Измерение притока подземных вод можно производить следующим способом:

визуальным;

при помощи расходомеров (рис. 5 приложения 2), водосливов, лотков, мерных баков, гидрометрических вертушек и т. п. [43, 56, 57 и др.];

с помощью индикаторов [4, 5, 58];

аналитически, зная разность напоров и коэффициент проницаемости обделки [54, 59].

В зависимости от конкретных условий величину притока подземных вод целесообразно определять приходящейся на все сооружение, на отдельный его участок или на отдельный элемент (например, на выходе из дренажных выпусков).

При измерении фильтрационных расходов необходимо измерять температуру фильтрующейся воды, имея в виду, что изменение температуры воды на 1°С изменяет ее расход примерно на 3%.

Сопоставление температуры воды в местах ее выходов в сооружение с температурой воды верхнего бьефа позволяет судить о скорости фильтрации по трещинам в массиве.

4.6. Индикаторы могут быть искусственные и естественные (например, тритий, дейтерий).

Используя различные приемы индикации исследуемых потоков, можно уточнить места выхода потока, локализовать зону питания, проследить траекторию.

При таких исследованиях нередко имеется возможность количественных оценок таких параметров, как скорость потока и дебит.

Для исследования направления и скорости фильтрационного потока к подземным сооружениям может быть использован солемер.

Определение скоростей фильтрации с помощью солемера на Чарвакском гидроузле проводили способом пусковых и наблюдательных скважин. Запуск соли осуществляли в пьезометры, контролирующие верховую часть фильтрационного потока. Наблюдения за появлением индикатора вели непрерывно в течение длительного времени в местах разгрузки потока — источниках, дренах и пьезометрах низовой части потока [58].

Пути фильтрации в массиве пород можно определить также геоэлектрическим и сейсмическим способами, радиоактивными индикаторами.

4.7. При изменении расхода необходимо также вести наблюдения за цветом воды, количеством, качеством и гранулометрическим составом твердых частиц, выносимых фильтрационным потоком из массива или зацементированной породы.

4.8. В случае целесообразности, можно предусматривать дистанционное измерение фильтрационного расхода с выводом указателей на центральный пункт. При превышении фильтрационным расходом определенной величины, звуковой сигнал автоматически передается на пункт.

4.9. При непредвиденном увеличении расхода воды изучают все имеющиеся материалы наблюдений и проводят специальные исследования, включающие учащенные измерения температуры воды в дренах и дренажных устройствах, откачки воды из дрен с фиксацией скорости последующего восстановления уровня, опыты по определению влияния водоводов на фильтрационную обстановку на участке расположения сооружения.

4.10. В процессе наблюдений следует следить за изменением дебита дренажей и устанавливать причину этого изменения. В случае зарастания системы дренажа солями определяют их химический состав и дают рекомендации по очистке дренажа или режиму его работы (в случае регулируемого дренажа).

Дренажи помимо своего основного назначения могут использоваться также как средство весьма эффективного контроля за состоянием сооружения и вмещающего его массива горных пород. Они позволяют выполнять наблюдения за фильтрационным расходом как по отдельным сильно фильтрующим скважинам так и по целым участкам дренажей.

Для проведения дифференцированного контроля за работой дренажа его выполняют секционным.

При наблюдении за работой шпуровых дренажей следует иметь в виду, что из-за неравномерной трещиноватости массива пород, вмещающего сооружение, некоторые шпуры могут оказаться бездействующими, будучи пробуренными в монолитных блоках породы или в блоках с закрытыми трещинами.

Если подземные воды, каптируемые дренажными устройствами, отводятся в туннели, подающие воду для питьевого и промышленного водоснабжения, необходимо вести систематические наблюдения за химическим составом дренажной воды.

При наличии в напорных туннелях клапанных выпусков дренажных вод при осмотре туннелей необходимо проверять герметичность и чистоту клапанов.

Особое внимание при натурных наблюдениях следует уделять состоянию дренажей и водоотводных устройств (особенно с применением закрытых труб) в сооружениях, значительно заглубленных под уровень подземных вод, обладающих агрессией к цементу, неблагоприятной жесткостью, наличием активной углекислоты, органических кислот, сульфатов и сульфидов, сероводорода и некоторых хлоридов.

Наблюдения за химической суффозией и кольматажем

4.11. Под химической суффозией понимают процесс растворения и выщелачивания из массива пород и бетона растворимых включений.

Закономерности развития процесса суффозии зависят от многих факторов, из которых наиболее важными являются: вид, количество и форма залегания растворимых составляющих, состав фильтрующейся воды, температура и давление (фильтрационное и геостатическое), условия движения воды к растворяемому веществу и условия удаления продуктов растворения от границы растворимое вещество — вода.

В зависимости от вида растворяемых составляющих различают трудно-, средне- и легкорастворимые грунты. Контроль за суффозией обычно проводят только при наличии средне- и легкорастворимых грунтов (гипс, каменная соль) [60].

К следствиям суффозии относятся: недопустимое увеличение фильтрационного расхода, образование сосредоточенных путей фильтрации, внутренний размыв грунта и т. п.

В случае неравномерного распределения растворимых составляющих, а также в случае фильтрационных потоков, неоднородных по химическому составу, при резких изменениях температуры и давления потока процессы химической суффозии иногда сопровождаются процессами химического кольматажа, т. е. выпадением солей и осадков и отложением их в породах (обызвествление и окремнение пород).

Развитие химического кольматажа приводит к уменьшению водопроницаемости пород и засорению дренажных устройств.

Для своевременного принятия мер в целях предупреждения нарушений нормальной эксплуатации подземного сооружения процессы химической суффозии во вмещающем массиве пород должны непрерывно контролироваться.

4.12. В задачи натурных наблюдений за суффозионными процессами и кольматажем входит:

установление наличия процесса суффозии и выяснение существа происходящих химических реакций;

определение области пласта, затронутой процессом суффозии и качественная оценка общих закономерностей развития изучаемого процесса;

определение количественных показателей, характеризующих процесс суффозии и интенсивность его развития;

определение показателей, характеризующих процесс кольматажа путей фильтрации и дренажа;

наблюдение за состоянием натеков извести, выщелачиваемой из бетонных обделок.

Натурные наблюдения химической суффозии проводят в соответствии с [60].

В подземных сооружениях, имеющих в своем составе скважинные (шпуровые) дренажи, необходимо закладывать еще и соответствующую КИА для наблюдения за работой дренажей,

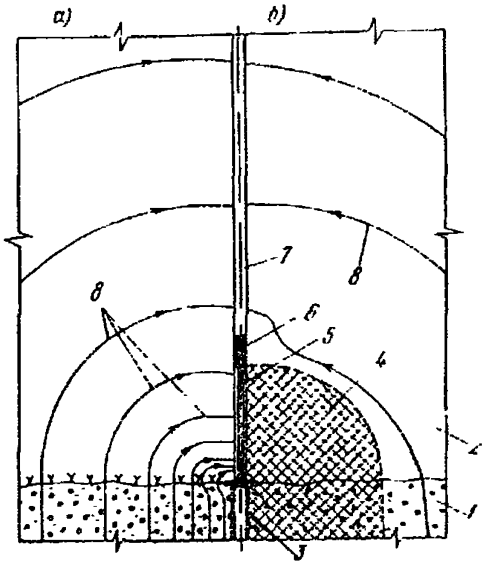


Рис. 20. Схема, поясняющая ход процесса развития химической кольматации пор в бетоне и скальной пород вблизи гильзы дренажной скважины

а — в первый период времени; *б* — в последующее время; *1* — бетон обделки; *2* — скальная порода; *3* — труба; *4* — зона породы и бетона, в которой произошло уплотнение пор, отложившимися в них частицами нерастворимых солей (химическая кольматация); *5* — гильза; *6* — манжет; *7* — дренажная скважина; *8* — линии тока вдоль которых происходит диффузия $Ca(OH)_2$ из бетона через породу в дренажную скважину с подземной водой при одновременной диффузии CO_2 из воды находящейся в скважине, через пород в бетон; такая встречная диффузия ускоряет процесс самоуплотнения щели между гильзой и породой, а также породы бетона вблизи дрены на ее участке с гильзой.

в частности, для выяснения возможности кольматажа дренажных скважин механического и особенно химического. При неблагоприятном составе подземных вод возможен химический кольматаж, в частности, при взаимодействии воды с известью выщелачиваемой из бетона обделки, в результате чего образу

ется нерастворимый углекислый кальций. Известь, выщелачиваемая фильтрационным потоком из бетонной обделки, при взаимодействии с углекислотой воздуха может выпадать в виде названной нерастворимой соли также внутри дренажной скважины и со временем засорять ее. Поэтому еще в период инженерно-геологических и гидрогеологических исследований следует закладывать в подземные выработки опытные скважины со специальными устройствами для наблюдения за интенсивностью механического и химического кольматажа. Устья таких скважин должны быть снабжены вентилями с манометрами для периодического измерения давления подземных вод при закрытой скважине и для регулирования расхода воды, вытекающей из скважины; должны иметься бачки для сбора этой воды с целью определения ее расхода и содержания нерастворимых частиц, если

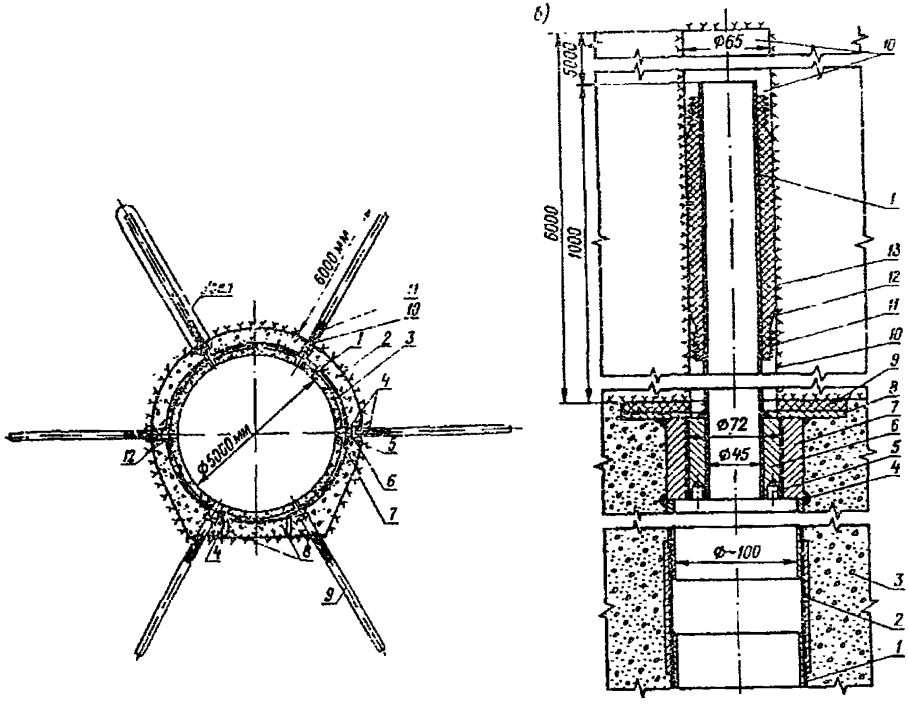


Рис. 21. Схема шпурового дренажа напорного водовода

а — поперечный разрез: *1* — стальная облицовка; *2* — бетон; *3* — труба кольцевая; *4* — труба; *5* — воротник; *6* — сгон; *7* — пробка; *8* — трубы продольные; *9* — скважина; *10* — труба; *11* — поролон (или стеклоткань); *12* — пробка.

б — узел: *1* — труба; *2* — сгон; *3* — бетон; *4* — сварка; *5* — гнездо (для шипа трубного ключа); *6* — втулка; *7* — муфта; *8* — фланец; *9* — прокладка; *10* — скважина; *11* — обвязка; *12* — поролон (или стеклоткань); *13* — скала.

они выносятся из трещин, заполненных суффозионно неустойчивым грунтом.

При разработке методики таких исследований целесообразно пользоваться рекомендациями Б. Б. Калачева, В. З. Чечота [61].

4.13. Если подземное сооружение расположено в породах, содержащих пресные гидрокарбонатные воды, то при натурных наблюдениях необходимо иметь в виду возможность химического кольматажа дренажных скважин.

Это вызвано способностью гидрокарбонатных вод изменять степень минерализации в зависимости от давления газов, содержащихся в воде.

В дренажных скважинах и на подходе к ним давление резко падает, температура в сооружениях повышается, из воды выделяется газовая составляющая и происходит изменение физико-химических условий, при которых дренируемые скважинами воды оказываются перенасыщенными карбонатами, способными выпадать в осадок. В результате на стенках скважин откладывается вещество в виде белого пористого налета, в основном карбонат кальция.

Наиболее благоприятные условия для выпадения солей и кольматации водопроводящих путей создаются в районе действия низкодебитных скважин [61].

При наличии регулируемого дренажа на основе данных натурных наблюдений за суффозией и кольматажем определяют наиболее рациональный режим работы дренажных устройств.

На рис. 20 показана схема, поясняющая ход процесса кольматации пор в бетоне и скальной породе вблизи дренажной скважины, а на рис. 21 схема конструкции некольматируемого шпурового дренажа со шпуровыми дренами, пригодного и для бетонной обделки без стальной облицовки.

МЕРОПРИЯТИЯ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ ПРИТОКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СООРУЖЕНИЯ

4.14. В зависимости от гидрогеологических и гидрохимических параметров и режима фильтрации в районе подземного сооружения, а также эксплуатационного состояния последнего следует осуществлять регулирование притока подземных вод в сооружение.

При отсутствии поступления воды из дренажной скважины после установления проектного положения кривой депрессии скважину следует затампонировать и в случае необходимости пробурить новую.

При появлении во время эксплуатации опасного выноса частиц грунта необходимо уменьшить расход дренируемой воды или установить обратный фильтр. Если указанные мероприятия не удается осуществить или если они не дадут достаточного эффекта, следует рассмотреть возможность устройства противофильтрационной цементации.

В случае, когда кривая депрессии (или давление подземных вод на обделку при местном дренаже) окажется значительно ниже предусмотренной проектом, целесообразно соответственно

уменьшить расход дренажа, и если этот расход снижается при одновременном подъеме кривой депрессии или увеличении давления подземных вод на обделку, то необходимо произвести чистку дренажных устройств или по возможности бурение дополнительных скважин.

Способ очистки дренажных устройств зависит от их конструктивных особенностей. Восстановление работоспособности, например, скважинного дренажа производится следующими способами:

очистка от осадка при помощи эрлифта с водоподъемными трубами, опущенными в нижнюю часть отстойника;

очистка скважины буровым наконечником (или в комбинации с ершом-щеткой) с одновременной промывкой водой и последующей прокачкой эрлифтом;

обработка соляной кислотой для растворения осадка и удаления промывкой продуктов реакции;

рыхление породы в призабойной области взрывами малых зарядов;

свабирование (поршневание);

смена фильтров.

В случае применения регулируемых дренажей их опорожнение необходимо производить медленно во избежание образования больших градиентов напора на входе в дрены.

4.15. При наблюдениях за притоком подземных вод и регулировании их притока необходимо учитывать следующие указания СНиПа [8].

Расчетные значения осредненного критического градиента напора $J^{ср}_{к}$ для нескальных грунтов основания следует принимать по [8].

Расчетные значения местного критического градиента напора $J_к$ (в зоне выхода фильтрационного потока в нижний бьеф) для суффозионных грунтов надлежит определять на физических моделях или исследованиями в полевых условиях.

Критические скорости фильтрации $v_к$ в трещинах скальных оснований при ширине их раскрытия более 1 мм следует прини-

Таблица 1

Грунты, заполняющие трещины скального основания	Критическая скорость фильтрации $v_к$, см/с
Глины	50
Суглинки	30
Супеси с $J \geqslant 0{,}03$	15

мать по табл. 1, а при ширине раскрытия трещин менее 1 мм величины критических скоростей не нормируются [8].

Расчет местной фильтрационной прочности нескальных оснований следует производить в зонах выхода фильтрационного по-

тока в дренажные устройства по формуле [8] $J \leqslant J_к$, где J – местный градиент напора в зонах выхода фильтрационного потока, определяемый расчетами.

Расчет местной фильтрационной прочности скальных оснований следует производить по формуле [8]: $v \leqslant v_к$, где v — скорость фильтрации в трещинах скального основания; $v_к$ — критическая скорость фильтрации в трещинах скального основания принимаемая по табл. 1.

Величину v следует определять как частное от деления фильтрационного расхода воды в данном направлении на суммарное живое сечение трещин в плоскости, перпендикулярной этому направлению.

5. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕМ И УТЕЧКАМИ ВОДЫ В ТУННЕЛЯХ И ШАХТАХ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

5.1. Основным материалом для обделок напорных гидротехнических туннелей и шахт в настоящее время является бетон и его разновидности (железобетон, набрызг-бетон, торкрет, железоторкрет).

В связи с тем, что расчетное сопротивление растяжению применяемых на практике марок бетона невелико (первые две единицы МПа), при заполнении водой глубоких туннелей и шахт в их обделках, как правило, образуются трещины, направленные преимущественно вдоль сооружения.

Количество и направление трещин, а также величина их раскрытия зависят от ряда факторов: структуры слагающих горный массив пород, характера напластования, размеров блоков, деформативности горного массива, формы выработки, способа проходки выработки, материала и толщины обделки, наличия арматуры, величины напора воды в туннеле и др.

Причинами трещинообразования и соответственно утечек воды из туннелей и шахт при эксплуатации являются неверная оценка деформативных и фильтрационных свойств горного массива при изысканиях отступления от проекта и технических условий производства работ при строительстве, коррозия бетона и арматуры.

Вместе с тем лимитированное раскрытие трещин разрешено нормативными документами.

5.2. Кроме трещин в обделке одним из основных факторов, влияющих на фильтрацию воды из напорного туннеля, является водопроницаемость горных пород. При этом необходимо отметить, что наличие трещин в обделке не всегда обусловливает фильтрацию из туннеля. На величину утечек воды из туннеля через нетрещиностойкие обделки в основном влияет степень водопроницаемости пород. Если порода практически водонепроницаема, то независимо от того, имеются трещины в обделке или

нет, туннель будет практически водонепроницаемым. Если порода водопроницаема, то при наличии трещин в обделке фильтрационные потери воды из туннеля резко возрастают при отсутствии естественных или фильтрационных подземных вод с напором, меньшим напора воды внутри водовода.

Трещины в обделке, как правило, бывают приурочены к крупным трещинам в скальном массиве, которые также начинают расширяться при передаче усилий на массив.

5.3. Количеством и величиной раскрытия трещин в обделках можно в значительной степени управлять следующими способами: дифференцированной цементацией породы, количеством и степенью дисперсности арматуры, устройством эластичных прокладок на внешней поверхности обделки или между двумя слоями обделки, изолированием арматуры на участках ожидаемого образования трещин, устройством концентраторов напряжений на внутренней поверхности обделки, установкой прерывистой в поперечных сечениях арматуры, соответствующей анкеровкой породы вокруг выработки и др.

Возможность инженерного воздействия на процессы трещинообразования в обделках позволяет конструировать их с расчетным раскрытием трещин, не превышающим допустимую величину, которая устанавливается как наименьшая из трех значений, определенных из условий: а) обеспечения долговечности обделки; б) сохранения устойчивости горных пород, в которых залегает туннель; в) ограничения фильтрационных потерь воды экономически обоснованной величиной.

Допустимые величины раскрытия трещин в обделках регламентированы (табл. 2), [3].

Таблица 2

Градиент напора воды, $J_н$	Допускаемые величины раскрытия трещин, мм, из условия							
	долговечности бетона при гидрокарбонатной щелочности воды, мг·экв/л				сохранности арматуры при суммарной концентрации ионов Cl' и SO_4'', мг/л			
	0,25	1	2	2,5 и более	до 50	100	200	400—1000
до 5	0,1	0,18	0,35	0,5	0,5	0,4	0,35	0,3
50	0,07	0,15	0,32	0,45	0,5	0,4	0,35	0,3
300	0,05	0,12	0,28	0,4	0,4	0,3	0,25	0,2

Примечание. Градиент напора в обделках принимается при коэффициентах фильтрации породы:

а) $k_ф \leqslant 10^{-4}$ см/с, $J_н = 1$;

б) $k_ф \geqslant 10^{-2}$ см/с — по формуле $J_н = \dfrac{100p - H_п}{h_{об}}$, где p — внутреннее давление воды, МПа, $H_п$ — напор подземных вод, см; $h_{об}$ — толщина обделки, см;

в) в интервале $10^{-4} < k_ф < 10^{-2}$ см/с величина $J_н$ определяется по интерполяции.

Для туннелей II, III и IV классов допускаемые величины раскрытия трещин принимаются соответственно в 1,3; 1,6 и 2 раза больше, чем значения приведенные в таблице, но не более 0,5 мм.

Допустимая величина утечки воды из туннелей определяется по [3].

5.4. Помимо отрицательного эффекта, в определенных условиях фильтрация воды из напорных туннелей и шахт оказывает положительную роль, выражающуюся в виде противодавления с наружной стороны. Количественно противодавление воды фильтрующейся через трещины в обделке, определяют следующим образом (при этом подразумевается, что фильтрация воды через плотный нетрещиноватый бетон обделки практического значения не имеет).

1. В случаях сухих и водонасыщенных практически водонепроницаемых пород с $k_\Phi \leqslant 10^{-3}$ см/с и напора подземных вод $H_\text{п}$, не превышающем внутреннее давление p воды в туннеле ($H_\text{п} \simeq 10^4 p$, см), величина противодавления, см:

$$P \simeq (10^4 p - J_\text{в} h_\text{об})\, n,$$

где $J_\text{п}$ — градиент напора в обделках, определяемый по формулам, приведенным в примечаниях к таблице и зависящий от коэффициента фильтрации породы; n — коэффициент перегрузки от давления подземных вод, принимаемый равным 0,9 [3].

При $H_\text{п} \geqslant 10^4 p$ противодавление подземных вод

$$P \simeq H_\text{п} \cdot 10^4 n.$$

При этом величину напора подземных вод принимают от уровня воды в водохранилище (водотока) или исходя из положения поверхности депрессии.

2. При залегании туннелей в сильно и очень сильнопроницаемых породах с $k_\Phi \geqslant 10^{-3}$ см/с величина противодавления принимается равной:

в водонасыщенных породах

$$P \simeq H_\text{п} \cdot 10^4 n \quad (n = 0{,}9);$$

в сухих породах

$$P = 0.$$

При расчете трещиностойких бетонных и железобетонных обделок, когда исключается возможность подпитки подземных вод из сооружения, противодавление подземных вод предлагается учитывать только на участках прохождения водовода под уровнем воды в водохранилище (водотоке) или под зеркалом подземных вод. При прохождении водовода на участке под депрессионной поверхностью подземных вод в нижнем бьефе плотины или там, где положение депрессионной поверхности определено недостаточно достоверно, коэффициент перегрузки от давления подземных вод целесообразно (до получения более точных на-

турных данных) принимать равным 0,5. И только при надежном обосновании положения депрессионной поверхности коэффициент перегрузки можно принимать равным 0,9.

5.5. Согласно нормам [3] величина допустимого фильтрационного расхода на 1000 м² внутренней поверхности туннелей с бетонной (железобетонной) обделкой должна быть не более 0,1 — 0,5 л/с при $p > 1$ МПа и 0,5 — 1,0 л/с при $p \leqslant 1$ МПа.

СПОСОБЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И УТЕЧЕК ВОДЫ

5.6. Фильтрационный расход (утечки) воды из напорных туннелей можно определять как расчетно-теоретическим, так и экспериментальным путем в полупроизводственных (в опытных камерах и шурфах) и натурных (в туннелях) условиях.

Использование теоретических формул для определения фильтрационных потерь воды из напорных туннелей не всегда может дать достоверные результаты по ряду причин, основной из которых является несоответствие расчетного и действительного коэффициентов фильтрации бетона обделки как материала и как конструкции. Обусловливается это тем, что в реальной бетонной обделке туннеля практически не удается получить идентичную с лабораторным образцом структуру, влажность, напряженно-деформированное состояние и монолитность, которая в условиях туннелей нарушается вследствие наличия швов и дефектов бетонирования, трещин, закладных деталей, арматуры, цементационных скважин и др. Значительно большая часть профильтровавшейся воды поступает не через собственно бетон, а по сосредоточенным путям фильтрации.

Натурные наблюдения за открытыми бетонными сооружениями показывают, что фильтрация воды в бетонных гидротехнических сооружениях происходит в основном по трещинам, швам и различным дефектам бетонирования.

5.7. Наиболее достоверные результаты по трещинообразованию и фильтрационным утечкам воды из туннелей и шахт можно получить экспериментальным путем в натурных условиях (в опытных камерах) в процессе предпусковых испытаний или в период эксплуатации сооружения.

Опыты на фильтрацию в опытных камерах в нашей стране были проведены на строительствах Храмских ГЭС-1 и ГЭС-2, Ингурской и Нурекской ГЭС [62, 63].

5.8. Согласно СНиП [64] приемку напорных гидротехнических туннелей гидроэлектростанций надо производить с испытанием обделки на внутреннее давление воды. При этом величина давления для испытания и допускаемая утечка воды через обделку устанавливается в проекте на основе технико-экономических расчетов с учетом стоимости противофильтрационных

мероприятий с одной стороны, и теряемой выработки электро энергии вследствие утечек — с другой.

Предпусковые испытания на фильтрацию в натурных соору жениях в нашей стране были осуществлены (начиная с 1930 г. в деривационных туннелях Дзорагетской, Гизельдонской, Су хумской, Храмской ГЭС-1, Ткибульской и Ереванской ГЭС.

5.9. Испытание напорных туннелей на фильтрацию в период эксплуатации впервые было осуществлено в деривационном тун неле Люцерн-Энгольберт (Швейцария) в 1905 г. и с тех пор та кие испытания стали проводить во многих странах.

В [65] приведена таблица величин фильтрационных потер воды из напорных туннелей и шахт, составленная на основании изучения и обобщения материалов испытаний около двухсо опытных камер и туннелей. В этой таблице даются две величи ны фильтрационных потерь воды из напорных туннелей: удель ная фильтрация $Q_в$ в расчете на 1000 м² внутренней поверхно сти испытываемой обделки и удельная фильтрация Q_0 в расчете на 1000 м² поверхности обделки, отнесенная к 0,1 МПа внутрен него давления p воды в туннеле. На некоторых объектах величи ны фильтрационного расхода из туннелей существенно превосхо дят допустимые по нашим нормам.

5.10. При фильтрационных расчетах подземных сооружений часто условно принимают, что бетонные обделки непроницаемы, хотя известно, что фактические коэффициенты фильтрации бе тона в гидротехнических сооружениях, в том числе и обделок, имеют достаточно высокие значения, достигая в ряде случаев 10^{-3} — 10^{-5} см/с (1 — 0,01 м/сут). Исключение составляют об делки, имеющие специальную гидроизоляцию, например, сталь ную облицовку, когда расчетный коэффициент фильтрации мож но принять равным нулю.

В настоящее время, согласно [3], утечки воды из напорных туннелей определяют следующим образом. Определяют величи ну раскрытия и гидравлического сопротивления трещин в бетон ной и железобетонной обделке и затем рассчитывают величину фильтрационного расхода воды из туннеля.

5.11. Утечки воды из круглоцилиндрических напорных камер определяют при создании в них внутреннего гидростатического давления, моделируя таким образом в определенном масштабе исследуемое сооружение. В камеру, огражденную бетонной проб кой с люком, подводят трубы для нагнетания воды, выпуска воздуха, манометрических измерений и вывода кабелей от конт рольно-измерительной аппаратуры дистанционного действия.

Преимуществом способа напорных камер является возмож ность получения в условиях, приближенных к эксплуатацион ным, данных по фильтрационным свойствам обделок и массива пород, а также по напряженному состоянию обделка — массив породы [62, 63, 66 — 71].

5.12. Утечки воды через обделку также определяют, закладывая в нее при бетонировании устройство, образующее полость щелевой или иной формы, внутрь которой при испытании нагнетают воду. По величине ее расхода и напора, пользуясь числовым значением переходного коэффициента (полученного, например, методом ЭГДА), определяют величину коэффициента фильтрации бетонной обделки (рис. 1 приложения 5).

5.13. Исследование утечек воды с помощью щелевых камер заключается в том, что в опытную камеру при ее строительстве встраивают заподлицо с обделкой фрагменты других, подлежащих испытанию обделок, перекрываемых непроницаемым экраном, образующим щелевую камеру, соединенную с полостью опытной камеры посредством трубы, снабженной водомером и манометром (рис. 2 приложения 5).

5.14. Достоверные сведения по числу и величине раскрытия трещин в обделках можно получить во время их испытания в опытных камерах с помощью дифференциального измерителя, содержащего две штанги, заделываемые в обделку, одна из которых имеет шкалу; при этом штанги расположены параллельно. Первая штанга со шкалой снабжена движками с нониусами, а вторая — стержнями с сильфонами разной жесткости, которые позволяют измерять величины раскрытия трещин при различных уровнях давления в опытной камере (рис. 4 приложения 5).

5.15. Исследование трещинообразования может быть проведено с помощью максимального трещиномера, представляющего собой штангу, имеющую на одном конце упор, а на другом прорезь, образующую упругоработающий хвостовик. Штанга взаимодействует с опорами, заделанными в поперечных сечениях обделки (рис. 5 и 6 приложения 5).

5.16. Наблюдение за трещинообразованием можно осуществлять и с помощью перископа. Вдоль оси пробки, отсекающей опытную камеру, пропускают подзорную трубу, оборудованную под перископ (рис. 7 приложения 5).

ПРЕДПУСКОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

5.17. Исследование фильтрации воды из туннеля в предпусковой период на пробных участках следует проводить в составе комплексной программы исследования напорного туннеля, когда параллельно со статическими ведут исследования фильтрационных свойств обделки туннеля и массива горных пород при действии на них напора воды изнутри. Для этого необходимо дооборудование опытного участка расходомерами.

5.18. Для определения утечек воды из длинных отсеков водоводов на границах исследуемого интервала длиной L водовода *1* сооружают две перемычки *2* (рис. 22), и в отсек *3*, заключенный между ними, закачивают под заданным давлением воду, измеряя с помощью расходомеров или объемным способом ее расход.

5.19. Для определения утечек воды из коротких отсеков в водоводе (туннеле) устанавливают две связанные между собой заглушки, одна из которых снабжена лазом. Заглушки имеют по

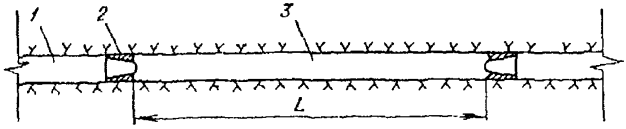


Рис. 22. Схема к измерению утечек воды из отсека водовода, выделенного перемычками, испытывающими одностороннее давление воды

1 — водовод; *2* — перемычки; *3*— отсек

периметру уплотнение для герметизации отсека. Этим способом можно определять качество строительных и деформационных швов.

5.20. Утечки воды можно также определить с помощью пристенной камеры, для чего на исследуемом участке обделки параллельно ей устраивают продольную стенку, скрепленную своими короткими торцовыми стенками с обделкой. В образованную между обделкой и стенкой камеру подают воду и замеряют фильтрационный расход (рис. 9 приложения 5).

5.21. При определении проницаемости обделки стен с помощью накладного щита на дефектном участке обделки к ней прикрепляют снабженный периметральным уплотнением стальной лист, под которым образуется щелевая полость. Через штуцер в листе в щель нагнетают воду с измерением ее расхода (рис. 10 приложения 5).

5.22. В способе определения проницаемости бетонных обделок по водопоглощению скважин в обделке пробуривают скважину, в которую нагнетают воду с измерением ее расхода (рис. 11 приложения 5).

5.23. При определении проницаемости бетонных обделок путем отсоса воздуха из бетона на исследуемом участке обделки накладывают колпак прибора [72] и создают в нем вакуум. Затем по времени восстановления давления воздуха, отсасываемого из бетона, с помощью тарировочного графика определяют величину проницаемости (рис. 12 приложения 5).

5.24. Водопроницаемость обделки также можно оценить по результатам испытаний выбуренных кернов. С этой целью из бетона в характерных местах обделки (свод, стены, лоток) выбуривают керны диаметром 100 — 150 мм, из которых изготавливают цилиндры длиной 150 мм [73]. Цилиндры в лаборатории испытывают на водопроницаемость с определением коэффициента фильтрации [74].

5.25. Для определения раскрытия и проницаемости отдельных трещин можно применить устройство, поясняемое на рис. 13

приложения 5. При трещинах, выходящих на поверхность скального массива или бетонной обделки, можно применить устройство, с помощью которого над трещиной образуют напорную камеру. В камеру при постоянном избыточном давлении нагнетают воздух, измеряя при этом его расход, и определяют коэффициент проницаемости трещины (рис. 14 приложения 5).

НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ

5.26. В период проведения натурных наблюдений за фильтрацией *можно применять приводимые ниже* способы и устройства.

Кроме того, необходимо вести наблюдения за появлением и исчезновением родников по трассе туннеля, за высачиванием фильтрационного потока на откосах вблизи трассы напорных туннелей, за изменением прочности пород при их размокании, выщелачиванием и состоянием оползневых склонов в связи с фильтрацией воды из туннелей.

5.27. Утечки воды, приходящиеся на всю длину водовода, определяют, перекрывая низовой и верховой затворы в водоводе и измеряя расход воды, поступающей в водовод через перепускное устройство с расходомером на входе в водовод (рис. 15 приложения 5).

5.28. Утечки воды из длинных участков водоводов, ограниченных диафрагмами, определяют устанавливая в туннеле деревянную диафрагму (перегородку) с отверстием, в которое вмонтирована гидрометрическая вертушка [75]. По ее показаниям определяют расход воды $q_ф$ на утечку через обделку водовода на участке от диафрагмы до закрытого низового затвора. В туннель вода поступает из водохранилища через открытый верховой затвор.

5.29. Определение утечек воды из заполненных водоводов также производится с помощью передвижных устройств.

Этот способ заключается в том, что в водоводе в заданном месте устанавливают передвижную перемычку-отсекатель снабженную водомером, фиксируют местоположение перемычки и снимают показания расходомера. Затем перемещают отсекатель на новое место и фиксируют фильтрационный расход [76] (рис. 16 и 17 приложения 5).

5.30. К специальным методам выявления мест сосредоточенных утечек из водоводов относятся методы: меченого облака, меченой эмульсии битума; волосных индикаторов; окрашенных линий тока; естественных индикаторов (радиоактивных изотопов, присутствующих в природных водах); а также геофизические, биофизические, геоэлектрические, сейсморазведки [30].

5.31. Исследование трещин можно производить с помощью полостей, образуемых в виде поперечных каналов внутри обделок при их бетонировании (рис. 19 приложения 5).

5.32. Для испытания водопроницаемости швов обделки можно применить устройство, состоящее из фильтров, закладываемых в шве бетонирования, и выведенных к наблюдательному пункту труб, оборудованных манометрами и вентилями (рис. 20 приложения 5).

5.33. Для исследования кольматажа трещин в процессе фильтрации воды из напорного туннеля можно применить устройство, показанное на рис. 21 приложения 5.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УТЕЧЕК ВОДЫ ПРИ НАЛИЧИИ ВОКРУГ ВОДОВОДОВ ЗАЦЕМЕНТИРОВАННОЙ ПОРОДЫ

5.34. Одним из рациональных типов обделок напорных туннелей является выравнивающая бетонная обделка с зацементированным кольцом породы, предназначенным в основном для предотвращения утечек воды из туннеля.

В период изысканий эффективность цементации породы целесообразно исследовать в опытных напорных гидравлических камерах.

Для контроля качества цементации в период строительства туннеля следует применять способы нагнетания воды в скважины (приложение 5) и ультразвукового просвечивания.

Для предпусковых и эксплуатационных испытаний зацементированного кольца породы рекомендуется закладывать КИА на участках врезки подходных выработок к туннелю, около помещений подъемных механизмов и т. п.

5.35. Для определения фактических размеров зацементированного кольца рекомендуется закладывать точечные пьезометры, располагая их в обделке, в зацементированном кольце породы и за его пределами (приложение 6).

5.36. При опорожнении (плавном или аварийном) водоводов следует немедленно приступать к визуальным осмотрам состояния обделки, потому что выходы воды, фильтрующейся через обделку внутрь сооружения, позволяют четко выявить и зафиксировать дефектные места обделки. При этом желательно измерять расходы воды, высачивающейся из обнаруженных очагов, и скорость снижения этих расходов во времени. Кроме того, если при осмотре выявятся фильтрующие швы и трещины, следует зафиксировать их местоположение, протяженность, величину раскрытия швов и трещин, выяснить, содержит ли фильтрующаяся вода взвешенные частицы.

Приложение 1

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИБОРАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НИСом ГИДРОПРОЕКТА ДЛЯ НАТУРНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

По продолжительности времени возможного использования приборы и устройства для натурных наблюдений делятся на долговременные и кратковременные. Долговременные приборы — те, которые могут существовать в рабочем состоянии или возобновляться на протяжении всего времени работы сооружений гидроузла. К ним относятся устройства, выполняемые из долговечных материалов и устанавливаемые в местах, доступных для их ремонта и замены. К кратковременным относятся приборы, закладываемые в местах, недоступных для ремонта и замены (в скважинах, насыпи, бетоне). Большинство таких приборов, широко применяемых в Советском Союзе и за рубежом, имеют струнный преобразователь с частотным выходным сигналом. Гарантийный срок работы таких приборов составляет 10 лет. Однако известно много случаев работы приборов со струнными преобразователями в течение 15 — 20 и более лет.

При составлении проекта закладки КИА для Рогунской ГЭС предпочтение отдавалось долговременным приборам и устройствам.

В таблице приведены перечень и краткая характеристика приборов, наиболее часто применяемых в сооружениях для наблюдения за фильтрацией. Все приведенные в таблице типы приборов, за исключением двухтрубных пьезометров, эксплуатируются на построенных и строящихся гидроузлах нашей страны.

По разделу различных геофизических наблюдений на Рогунской ГЭС предусмотрены и электрические исследования, в числе которых намечено изучение поля фильтрации подземных вод вблизи штолен и скважин до и после заполнения водохранилища. Это изучение будет выполнено съемкой электрического поля методом естественного потенциала. При создании стационарной сети наблюдений предполагается заложить в стенки штолен около 500 — 600 латунных электродов для заземления питающих и приемных линий электроразведочных установок и 200 — 300 неполяризующихся электродов специальной конструкции для проведения измерений методом ПС.

Наименование прибора (в скобках старое название)	Тип (в скобках старое название)	Назначение прибора	Изготовитель
Долговременные устройства			
Подземные выработки: шахты, штольни	—	Установка различных приборов.	Строительство
Смотровые шахты и галереи	—	Визуальные и инструментальные наблюдения	
Долговременные закладные приборы			
Пьезометр опускной напорный	ПОН	Измерение пьезометрических уровней	Строительство
Пьезометры:			
опускной безнапорный	ПОБ	Измерение пьезометрических уровней	Строительство
закладной	ПЗ		
двухтрубный	П2Т		
Водослив водомерный	ВВ	Измерение расходов воды	Строительство
Кратковременные закладные приборы			
Преобразователь давления струнный	ПДС (ДДС)	Измерение давления жидкости. Может применяться совместно с П2Т для перехода на частотный сигнал. При таком применении прибор относится к долговременным	Союзэнергоавтоматика
Преобразователь давления струнный с пористой насадкой (пьезодинамометр)	ПДС-3П (ДДС-3П) ПДС-10П (ДДС-10П ПДС-30П (ДДС-30П) ПДС-100П (ДДС-100П)	Измерение пьезометрических уровней и порового давления до 0,3 — 10 МПа	Союзэнергоавтоматика

Продолжение таблицы

Наименование прибора (в скобках старое название)	Тип (в скобках старое название)	Назначение прибора	Изготовитель
Преобразователь температуры струнный (термометр дистанционный)	ПТС (ДТС)	Измерение температуры	Союзэнергоавтоматика
Регистрирующая аппаратура (стационарная и переносная)			
Периодомер цифровой портативный	ПЦП	Регистрация показаний струнных преобразователей	Союзэнергоавтоматика
Щит манометрический с насосной установкой	—	Регистрация показаний двухтрубных пьезометров	Разработан в Гидропроекте
Электроконтактный уровнемер	УЭ-75	Измерение уровня воды в ПОБ	Разработан в Ленгидропроекте
Шпиц-масштаб	—	Измерение расхода воды в водосливе	то же
Расходомер-дозатор	—		
Термометр метеорологический	—	Измерение температуры воды в ВВ, источниках	„

ПРОЕКТ РАЗМЕЩЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КИА НА УЧАСТКЕ ПОДЗЕМНОГО ЗДАНИЯ РОГУНСКОЙ ГЭС

Участок створа Рогунской ГЭС располагается в узком *V*-образном ущелье реки; борта долины крутые, местами отвесные: правый поднимается над рекой на 700, левый на 400 м.

В геологическом отношении участок створа представляет единый тектонический блок, вытянутый параллельно долине реки и ограниченный двумя разломами второго и одним разломом первого порядка [78].

Скальные породы — песчаники, алевролиты нижнемелового возраста — вне зоны выветривания отличаются высокими прочностными свойствами независимо от принадлежности их к той или иной пачке.

Комплекс основных сооружений гидроузла состоит из каменно-земляной плотины, напорно-станционного узла, строительных туннелей, эксплуатационного водосброса, штольни по защите от размыва пласта соли в основании плотаны и сооружений селезащитного комплекса на сае (ручье) Оби-Шур.

В состав сооружений напорно-станционного комплекса (НСУ) входят водоприемник, подводящие туннели и турбинные водоводы, подземное здание станции и отводящие туннели.

После создания водохранилища помещения здания станции окажутся заглубленными под уровень воды в водохранилище до 300 м. Для предотвращения водопритоков в выработки и снижения давления подземных вод на обделки проектом предусмотрен комплекс дренажных мероприятий (рис. 1).

Учитывая низкую водопроницаемость и трещиноватость горных пород и соответственно малую вероятность вымыва заполнителей из трещин, в основу защитного комплекса в проекте положен общий скважинный дренаж вокруг здания ГЭС, снижающий давление подземных вод на обделки помещений до десятых долей МПа.

Кроме того, непосредственно за обделкой проектом предусмотрено устройство шпурового дренажа, который работает в поле давлений, созданных основным дренажем и, как бы под его защитой, дополнительно снижает давление до 0,1 МПа.

Для ликвидации трещин в массиве, не перехваченных скважинным дренажем, вокруг помещений предусмотрена цементация породы на глубину 15 м.

Исследования по выбору конструкции защитного дренажного комплекса проводились в лаборатории ЭГДА НИО Средазгидропроекта. Исследования проводились методом ЭГДА на плоских и объемных моделях — однородных электролитических

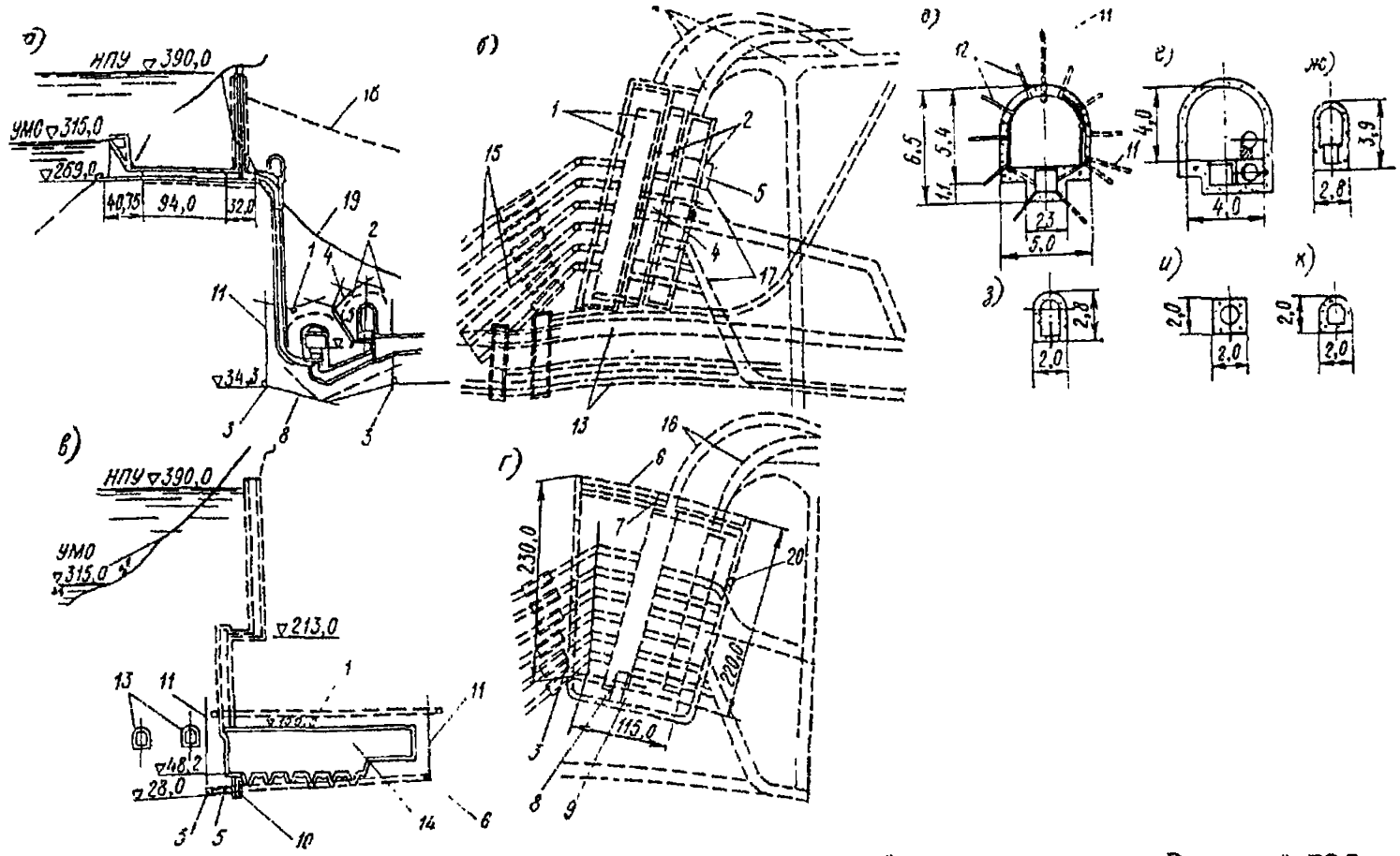


Рис. 1. Дренажные и противофильтрационные мероприятия в районе здания станции Рогунской ГЭС

а — поперечный разрез по зданию ГЭС; *б* — план-разрез по верхним дренажно-центральным штольням; *в* — продольный разрез по машинному залу; *г* — план-разрез по нижним дренажным туннелям; *д* — поперечный разрез по дренажному туннелю; *е* — то же по дренажно-цементационному туннелю; *ж* — то же по водосбросной штольне; *з* — то же по эвакуационной штольне; *и* — то же по водосбросной и вентиляционной шахтам; *к* — то же по водосбросной штольне; *1* — дренажно-цементационные штольни № 1 и № 2; *2* — дренажно-цементационные штольни № 3 и № 4; *3* — дренажный туннель № 1; *4* — водосбросная штольня № 2; *5* — водосбросная штольня № 1; *6* — эвакуационная штольня № 1; *7* — эвакуационная штольня № 3; *8* — эвакуационная штольня № 2; *9* — водосбросная штольня № 3; *10* — насосная откачки фильтрационной воды из ДТ-1; *11* — дренажные скважины; *12* — шпуровые дрены; *13* — строительные туннели I и II ярусов; *14* — машинный зал; *15* — подводящие туннели ГЭС; *16* — автотранспортные туннели; *17* — коллекторы и отводящие туннели ГЭС; *18* — кривая депрессии без противофильтрационных мероприятий; *19* — кривая депрессии при наличии дренажа.

и разнопроницаемых, изготовляемых из специальных электропроводных масс. На рис. 2 показана картина фильтрации на участке подземного здания ГЭС.

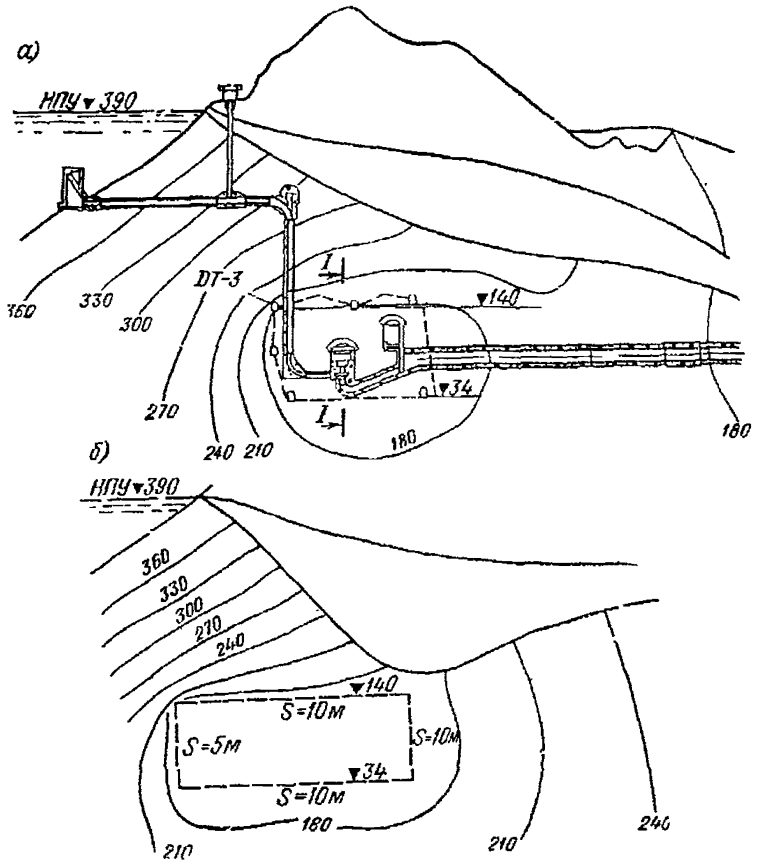


Рис. 2. Картина фильтрации на участке подземного здания ГЭС Рогунского гидроузла по результатам исследования методом ЭГДА на пространственной однородной электролитической модели в масштабе 1 : 2000 (лаборатория ЭГДА НИО Средазгидропроекта, 1979 г. Р. Х. Бухаиров, В. Лопушанский)

а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез *I—I*; *1* — поверхность депрессии без дренажа защиты напорно-силового узла (НСУ); 2 — то же при наличии дренажа защиты НСУ; ДТ-3 — дренажно-транспортный туннель № 3; числа при эквипотенциальных кривых выражают напоры в м при действующем фильтрационном напоре, равном H=390—34= =356 м; 390 и 34 м — условные отметки уровня воды соответственно в верхнем и нижнем бьефах; S — шаг дренажных скважин. Фильтрационный расход в дренаж защиты НСУ равен 230 л/с при H=356 м и коэффициенте фильтрации основного массива 0,05 м/сут.

По заданию Средазгидропроекта в НИСе Гидропроекта в 1978 г. был разработан технический проект размещения фильтрационной КИА на участке подземного здания Рогунской ГЭС (рис. 3 и 4).

Схема предусматривает контроль за эффективностью дренажных сооружений, за положением и динамикой депрессионной поверхности над зданием ГЭС, за величинами остаточных

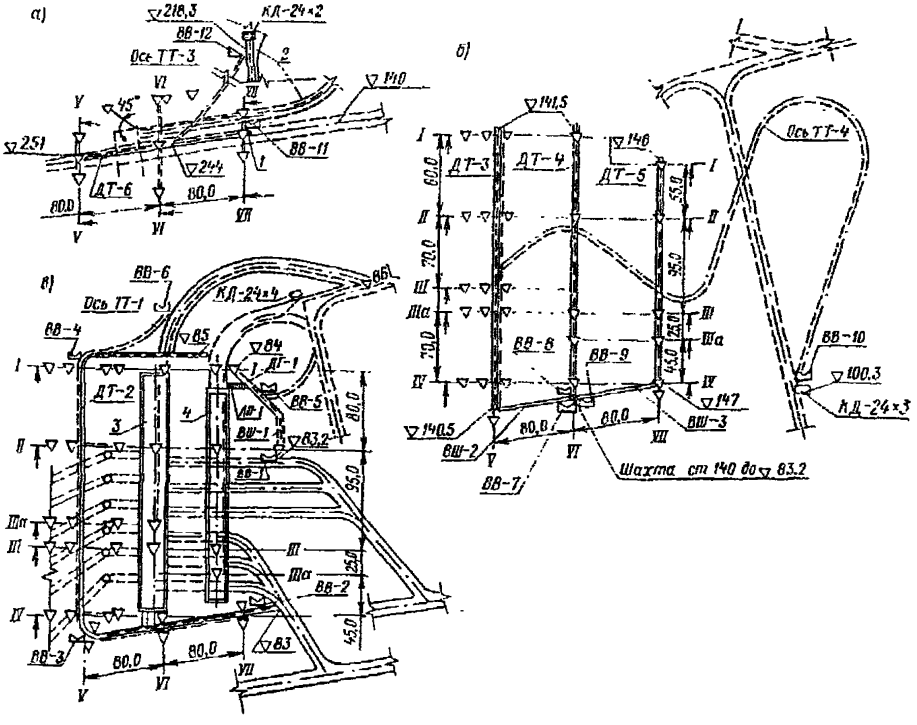


Рис. 3. Размещение КИА для наблюдения за фильтрацией на участке подземного здания Рогунской ГЭС

а, б, в — планы-разрезы на отметках (условных) соответственно: 251 ÷ 118 м (ДТ-6); 147 ÷ 103 м (ДТ-3; ДТ-4; ДТ-5); 86 ÷ 33 м (ДТ-1; ДТ-2). ДТ — дренажный туннель; ТТ — транспортный туннель; ВШ — водосбросная штольня; ЛП — лестничный проем; ВВ — водослив мерный; число справа от этих парных букв вслед за знаком тире или вслед за обозначением КД-24 (коммутационный щит) выражает порядковый номер: *1* — шахта между 238 и 140 м; *2* — правобережный транспортный и кабельный туннель; *3* — машинный зал; *4* — помещение трансформаторов.

напоров внутри контура дренажной системы, за температурным и гидрохимическим режимами фильтрационного потока.

Участок здания ГЭС предусмотрено оснастить 76 опускными пьезометрами, 76 струнными датчиками температуры, размещаемыми в семи вертикальных измерительных створах. Расстояние между ними составляет от 25 до 95 м.

В дренажных, водоотводных и подходных штольнях устанавливают 12 мерных водосливов, снабженных расходомерами-дозаторами качающегося типа с электропередачей показаний (рис. 5).

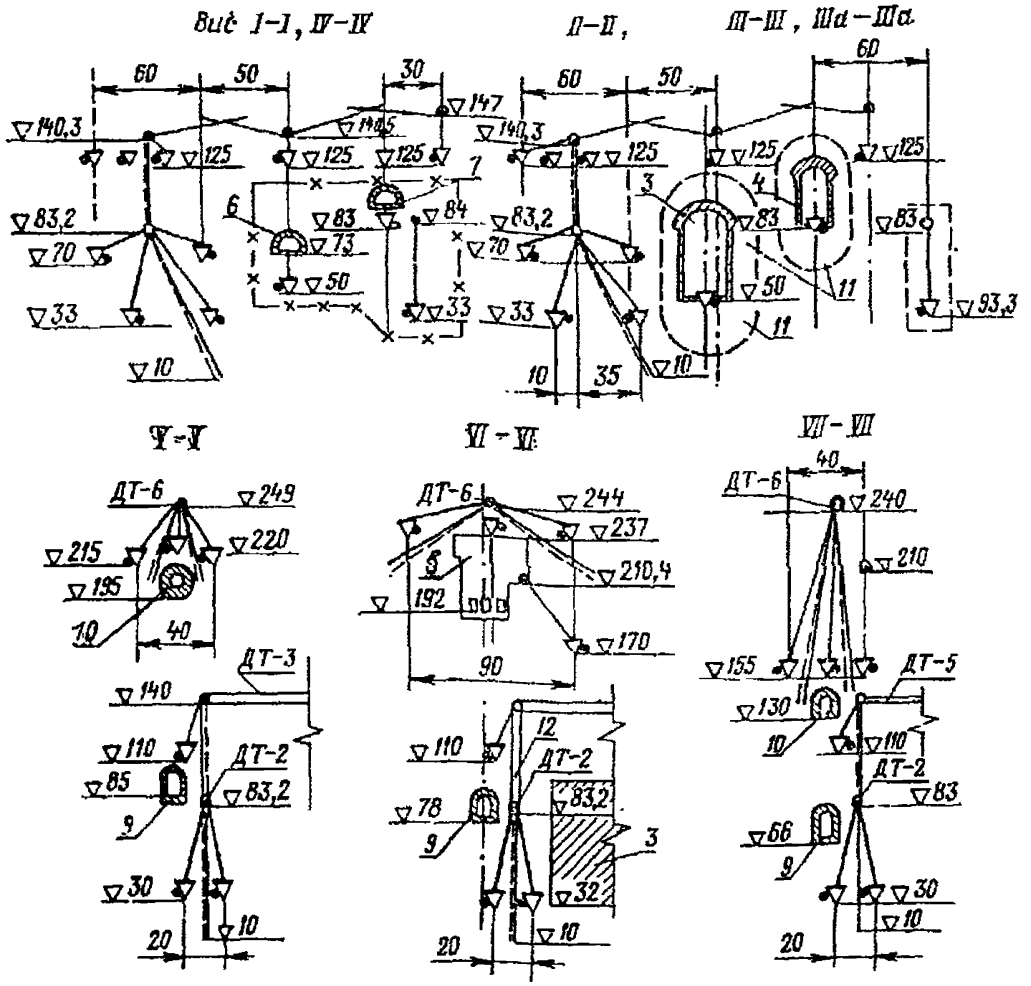


Рис. 4. Размещение КИА для наблюдения за фильтрацией на участке подземного здания Рогунской ГЭС

ВИС — вертикальные измерительные сечения, в которых заложена КИА; линии разрезов ВИС показаны римскими цифрами на рис. 3; ДТ — дренажный туннель, число справа от знака тире выражает порядковый номер; *1*, *2* — обозначения см. на рис. 3; *3* — машинный зал; *4* — помещение трансформаторов; *5* — помещение поъемных механизмов затворов строительного туннеля *III* яруса; *6* — транспортный туннель; *7* — кабельный туннель; *8* — грузовой туннель; *9* — строительный туннель *I* яруса; *10* — строительный туннель *II* яруса; *11* — контур зоны противофильтрационной цементации; *12* — шахта.

Для измерения пьезометрических напоров предусмотрены пьезометры, расположенные в створах измерительных сечений.

В скважины пьезометров (рис. 6) погружены струнные датчики (ДТС) температуры. Устья обсадных труб, выведенных

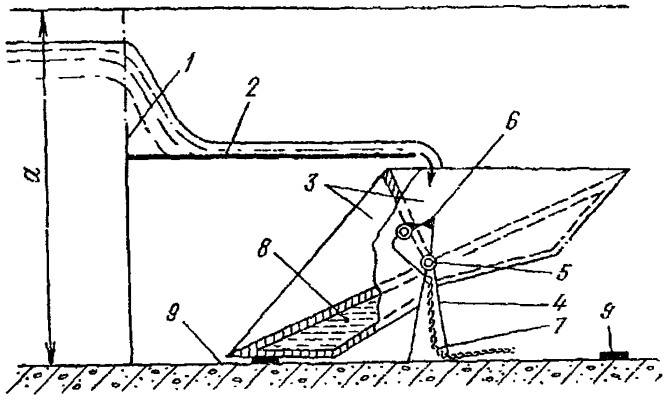


Рис. 5. Схема расходомера-дозатора

а — глубина водоотводящего лотка (в подошве выработки, туннеля дренажного, цементационного и т. п.): *1* — ось водослива; *2* — отводящий лоток; *3* — мерные сосуды; *4* — станина; *5* — ось качания мерных сосудов; *6* — электроконтактный замыкатель тока; *7* — кабель КРГД × 1,5 мм² к блоку питания и самописцу; *8* — жидкостный противовес; *9* — упругая подушка.

из этих скважин, оснащены оголовками (рис. 7) со струнными датчиками давления (ДДС). Коммутация в пределах скважин осуществляется кабелем КРГД — 2×1,5, в туннелях и штольнях — кабелем КНРЭТЭ — 4×1 и КНРЭТЭ — 24×1 мм². Защита коммутационной кабельной сети в пределах туннелей и штолен — швеллером № 20, коммутационных щитов — металлическими шкафами (из стальных уголков 50×50 и листовой стали толщиной 1 мм).

Коммутация от щитов КД-24 до центрального пульта осуществляется кабелем КНРЭТЭ — 24×1 мм².

В безнапорных пьезометрах (рис. 8) струнный датчик давления с пористой насадкой (ДДСП) подвешен на электрокабеле внутри водоприемника пьезометра.

На рис. 9 показаны водоприемники двухтрубного пьезометра.

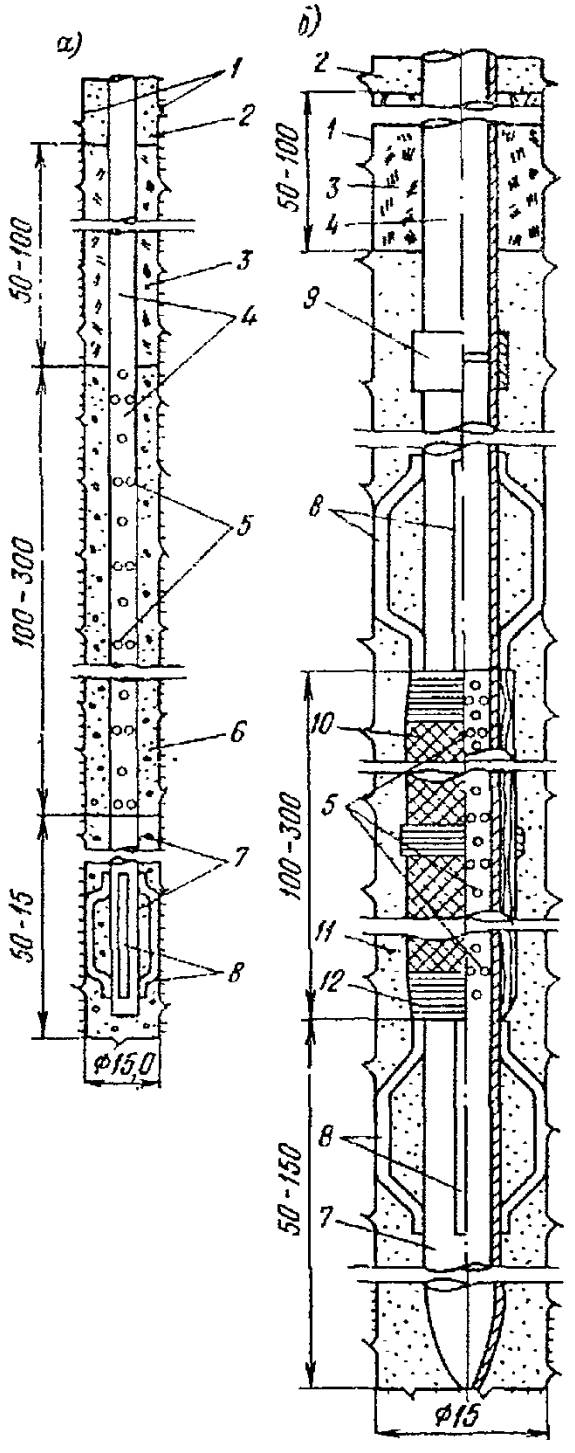


Рис. 6. Водоприемник пьезометра опускного напорного (ПОН)

а — в песчаниках; *б* — в глинисто-алевролитовых породах; *1* — стенка скважины; *2* — цементный раствор; *3* — тампон глиняный; *4* — труба диаметром 50 мм стальная оцинкованная или винипластовая; *5* — перфорация отверстиями, круглыми или щелевыми, со скважностью не менее 20%; *6* — гравийный фильтр; *7* — отстойник; *8* — скобы направляющие; *9* — муфта соединительная диаметром 50 мм; *10* — фильтровая обмотка—гофрированная сетка и стеклоткань; *11* — песчаный фильтр; *12* — обмотка изоляционной лентой или монтажной проволокой.

Примечание. В водоприемную часть каждого пьезометра опускается на кабеле КРГД — 2 × 1,5 мм² датчик температуры струнный (ДТС). Каждый пьезометр оборудуется оголовком, имеющим резьбовое гнездо для установки датчика давления струнного (ДДС), сальниковым выводом для кабеля от ДТС, съемной герметичной крышкой для возможности осуществления специальных скважинных исследований и патрубком для слива воды. Размеры, см.

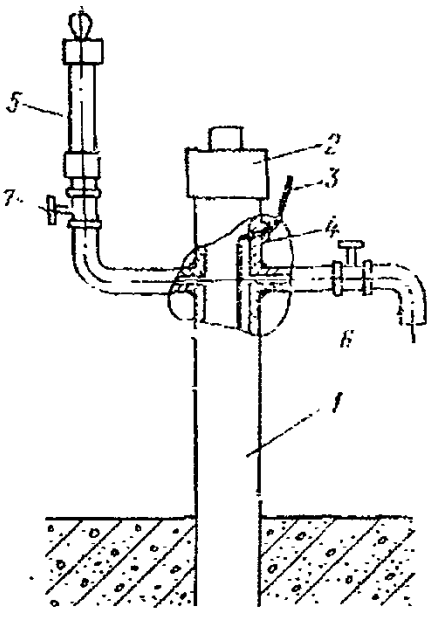


Рис. 7. Оголовок напорного пьезометра

1 — труба пьезометра; *2* — крышка съемная герметичная; *3* — кабель КРГД — 2Х1,5 мм² от датчика температуры струнного (ДТС), опущенного на этом кабеле в водоприемную часть пьезометра; *4* — сальниковый вывод кабеля; *5* — датчик давления струнный (ДДС); *6* — патрубок для слива воды; *7* — запорные вентили.

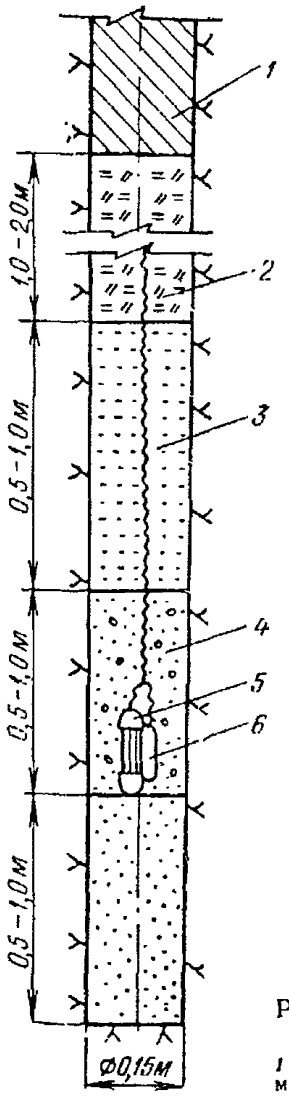


Рис. 8. Принципиальная схема установки опускных датчиков давления

1 — песчано-цементный раствор; *2* — глиняный тампон; *3* — мелкозернистый песок; *4* — крупнозернистый песок; *5* — датчик давления воды ДДСП; *6* — датчик температуры ДТС.

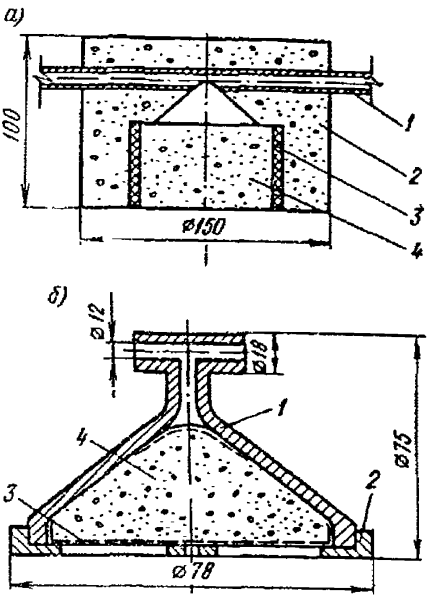


Рис. 9. Водоприемники двухтрубного пьезометра

а — конструкция НИСа Гидропроекта: *1* — трубка ПНП 12Х2 мм; *2* — бетонный корпус; *3* — цементный раствор; *4* — пористый фильтр; *б* — конструкция НИИ сантехники; *1* — полиэтиленовый корпус; *2* — прижимная крышка; *3* — латунная сетка; *4* — фильтр из мелкозернистого песка. Размеры, мм.

Приложение 3

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ КИА В ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ (КАТАСТРОФИЧЕСКОМ) ВОДОСБРОСЕ С ГЛУБИННЫМ ВОДОЗАБОРОМ НУРЕКСКОЙ ГЭС

Нурекская ГЭС расположена в среднем течении р. Вахша, где ее каньон имеет глубину более 300 м с бортами, поднимающимися под углом около 45°. На дне каньона в узком (шириной 50 — 60 м) ущелье проходит русло реки, расширяющееся до 70 — 120 м после выхода из ущелья [80].

Борта и основание каньона сложены пачками переслаивающихся песчаников и алевролитов, имеющих равномерное моно-

клинальное падение под углом 30 — 40° в сторону верхнего бьефа и правого берега. Трещиноватость песчаников и алевролитов слабая и развита преимущественно по напластованию. Большинство трещин напластования приурочено к контактам пачек. Трещины тектонического происхождения распространяются нормально к трещинам напластования. Все трещины частично или полностью заполнены супесчаным и глинистым материалом.

В состав сооружений Нурекского гидроузла входят каменно-земляная плотина высотой 290 м, напорно-станционный узел и эксплуатационные (катастрофические) водосбросы.

После возведения плотины на полную высоту уровень воды в водохранилище поднялся на 260 м, что резко изменило режим подземных вод в основании и бортах плотины, а следовательно, и вокруг подземных сооружений.

На рис. 1 на плане сооружения Нурекской ГЭС показаны гидроизогипсы фильтрационного потока при отношении коэффициентов фильтрации основания и цементационной завесы в основании плотины, равном 10. Гидроизогипсы построены в Лаборатории фильтрационных исследований ВНИИГа по результатам исследований методом ЭГДА на пространственной модели.

Трасса туннельного эксплуатационного водосброса длиной 1490 м проходит в породах с коэффициентом крепости по Протодьяконову 2÷8.

В качестве мест наблюдений за работой конструкций водосброса Средазгидропроектом совместно с НИСом Гидропроекта выбраны (рис. 2 и 3): створ I — в пределах напорной части водосброса; створ II — за камерой рабочих затворов, где возможно проявление наибольшего в безнапорной части давления подземных вод; створ III — в отводящей части сооружения, гда давление подземных вод по прогнозу уменьшается [81].

Для измерения давления подземных вод использовали дистанционные струнные приборы — преобразователи порового давления ПД16, установленные за обделкой сооружения, температуры — датчики ДТС, коммутация осуществлена кабелями марки КРПТ 2×1 мм²; для снятия отсчетов применены регистрирующие станции ЦС-5 и 4СД.

При начальных наблюдениях была установлена взаимосвязь между колебаниями уровня воды в водохранилище и проявлением фильтрационного давления на обделку. В створах II и III были выявлены низкие показания преобразователей порового давления и напряжения в арматуре лотка (створ II) и стен (створ III).

Для наблюдения за работой противофильтрационной и дренажной завес, выполненных вокруг помещений подъемных ме-

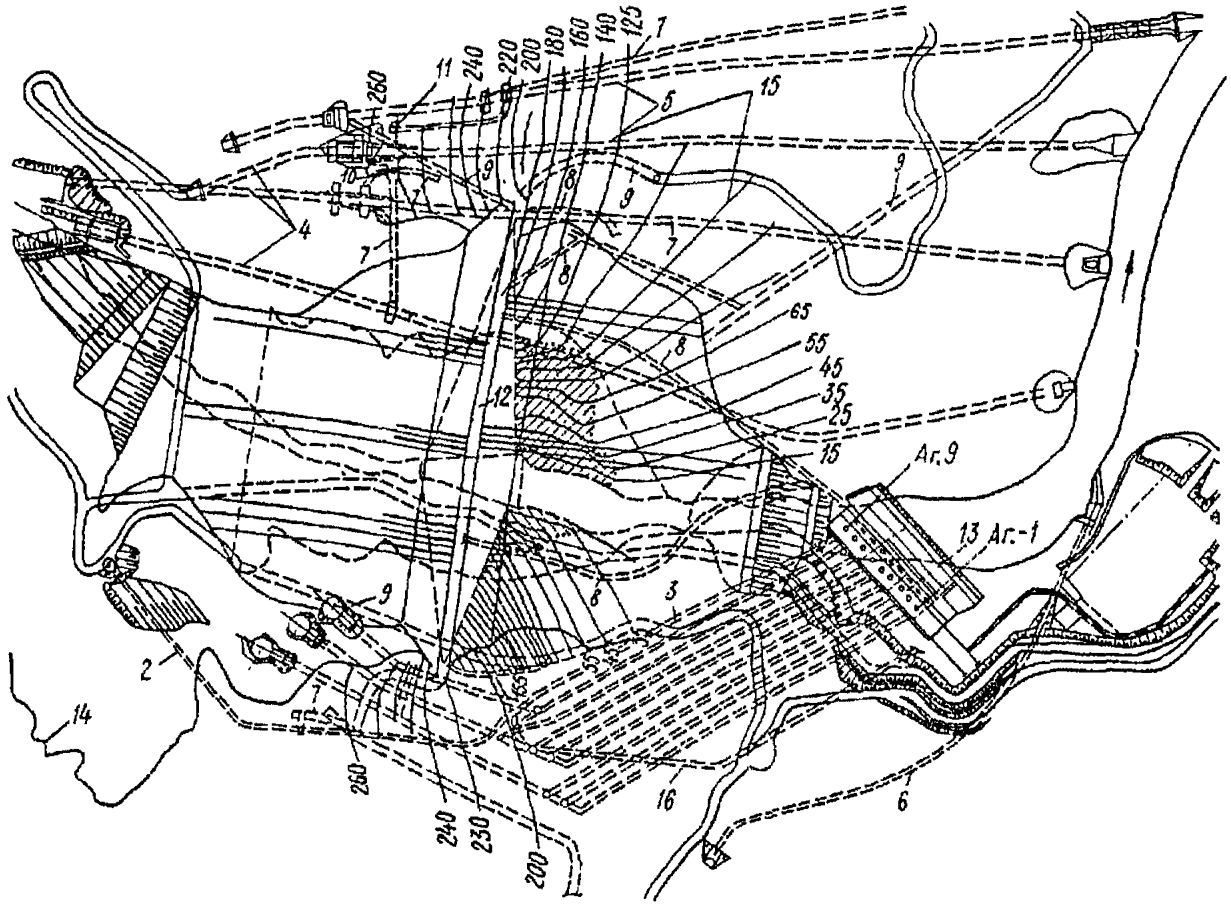


Рис. 1. Схема Нурекского гидроузла

1 — подводящие туннели ГЭС; *2* — промежуточный подводящий туннель ГЭС; *3* — турбинные водоводы; *4* — строительные туннели; *5* — эксплуатационные водосбросы; *6* — отводящий туннель сая «Лагерного»; *7* — соединительные туннели; *8* — транспортные туннели к цементационным потернам плотины; *9* — транспортные туннели на автодорогах; *10* — грузоаэрационная шахта; *11* — аэрационная шахта; *12* — гребень плотины; *13* — здание ГЭС; *14* — урез воды в водохранилище; *15* — гидроизогипсы фильтрационного потока при НПУ на отметке 265 м (по исследованиям ВНИИГа им. Веденеева методом ЭГДА на пространственной модели); *16* — дренажный туннель.

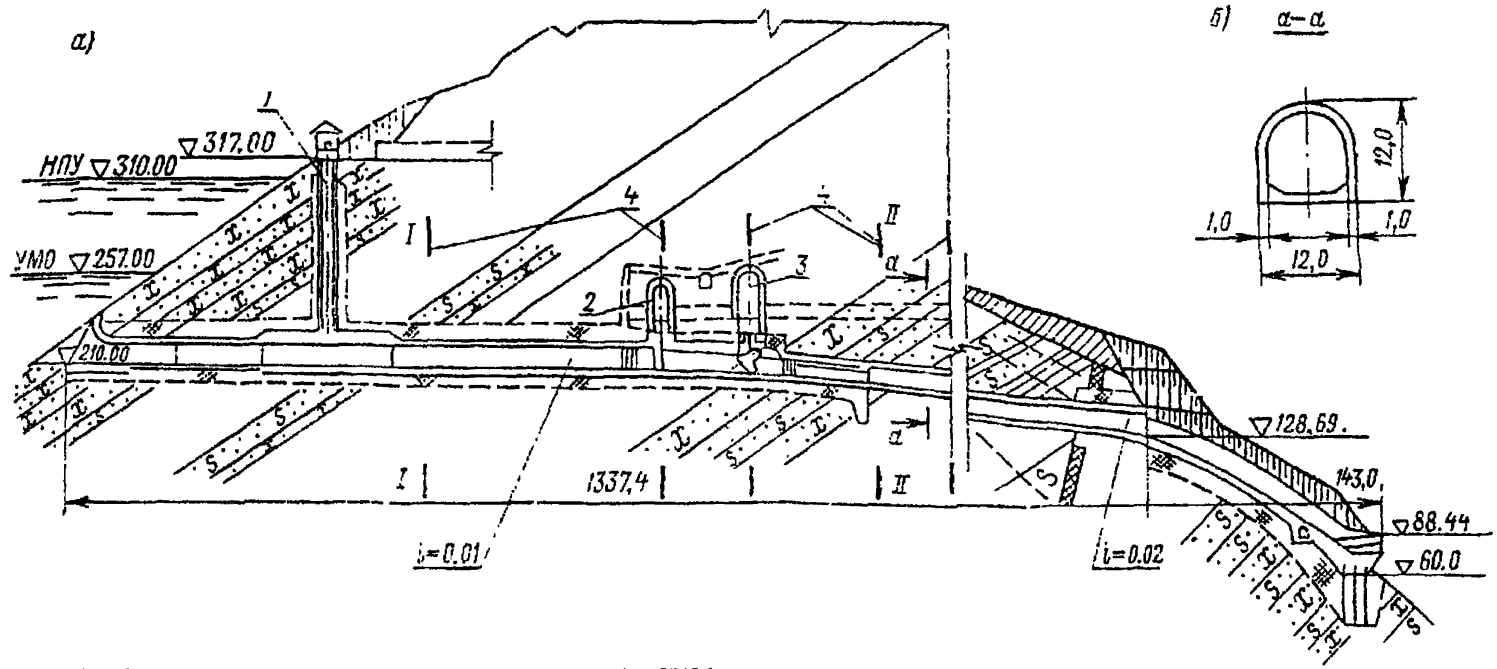


Рис. 2. Измерительные створы фильтрационной КИА в катастрофическом водосбросе с глубинным водозабором Нурекской ГЭС

а — продольный разрез; *б* — разрез по створу; *1* — шахта ремонтного затвора; *2, 3* — помещение подъемных механизмов соответственно ремонтных, аварийно-ремонтных и основных затворов; *4* — измерительные створы.

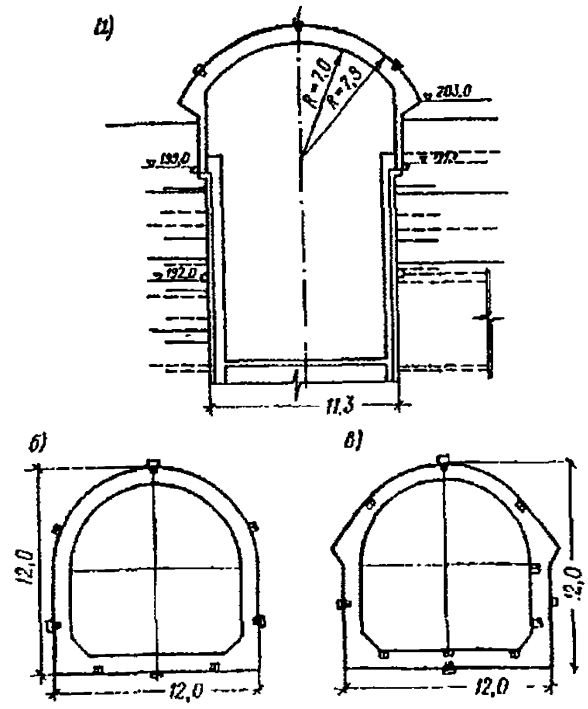


Рис. 3. Катастрофический водосброс с глубинным водозабором Нурекской ГЭС. Размещение фильтрационной КИА в измерительных створах

а — разрез по помещению подъемных механизмов аварийных затворов; *б* — разрез по створу *I—I*; *в* — разрез по створу *II—II*.

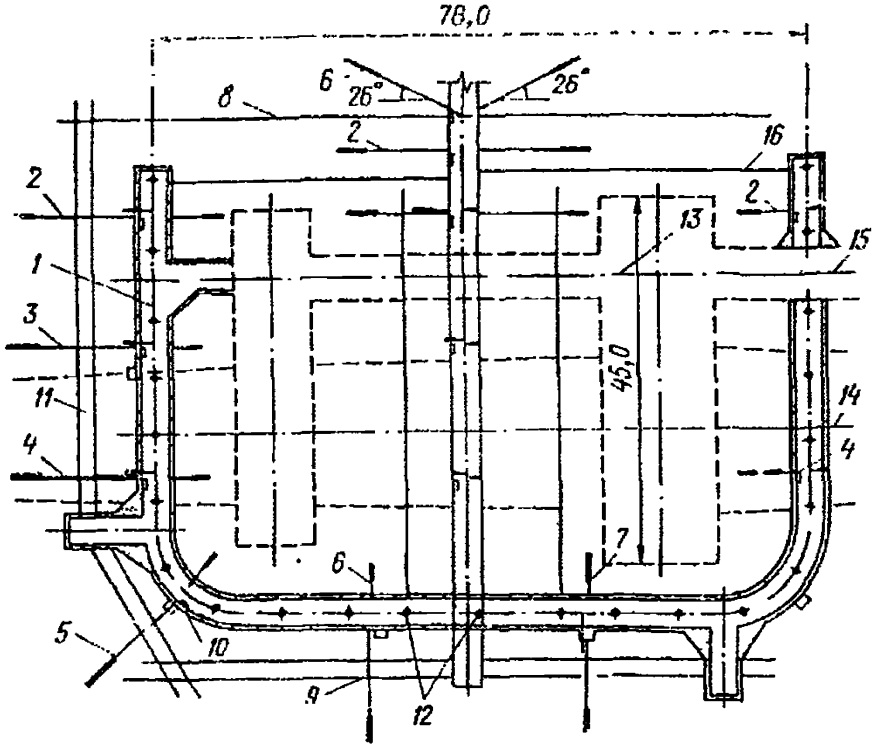


Рис. 4. Размещение пьезометров на участке помещения подъемных механизмов затворов водосброса с глубинным водозабором Нурекской ГЭС (схема)

1 — дренажно-цементационный туннель; *2* — створ *I*; *3* — створ *II*; *4* — створ *III*; *5* — створ *IV*; *6* — створ *V*; *7* — створ *VI*; *8* — левосторонняя цемзавеса; *9* — правосторонняя цемзавеса; *10* — шкаф КИА; *11* — верховая цемзавеса; *12* — дренажные скважины; *13* — ось соединительного туннеля; *14* — ось водосброса; *15* — ось грузового туннеля; *16* — дренажная завеса.

ханизмов затворов водосброса, Гидроспецпроектом совместно со Средазгидропроектом запроектирована пьезометрическая сеть (рис. 4 и 5).

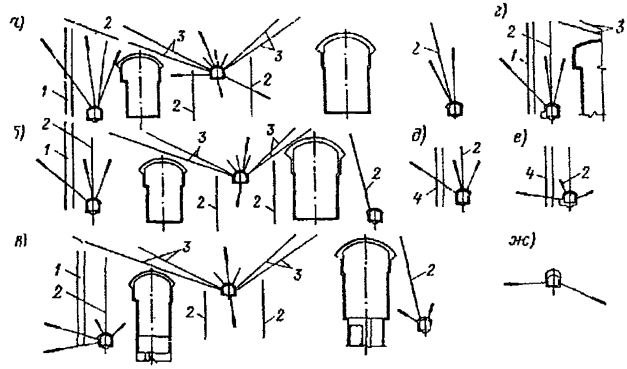


Рис. 5. Размещение пьезометров на участке помещения подъемных механизмов затворов водосброса с глубинным водозабором Нурекской ГЭС (разрезы)

а — створ *I(I')*; *б* — створ *II*; *в* — створ *III*; *г* — створ *IV*; *д* — створ *V*; *е* — створ *VI*; *ж* — створ *VII*; *1* — верховая цемзавеса; *2* — дренажная завеса; *3* — кровельная цемзавеса; *4* — правосторонняя цемзавеса.

В каждом створе пьезометры расположены перед цемзавесой, между цемзавесой и дренажем и за дренажной завесой.

Пьезометрические скважины в большей части являются наклонно-восстающими, поэтому их конструкция принята упрощенной — холостая часть скважины цементируется, водоприемник выполняется без фильтров.

Пьезометрические скважины выполняли после завершения цементационных работ по цемзавесе и до устройства дренажной завесы.

Толщина бетонной обделки дренажного туннеля принята 0,5 м.

Работы по устройству пьезометрических скважин (рис. 6, *а*) выполняли в следующем порядке.

Разбуривали скважину диаметром 105 мм, глубиной 1,5 м. Устанавливали в скважину трубу диаметром 80 мм, длиной 1,55 м. Раскрепляли ее в скважине, устанавливали тампон и инъектировали затрубное пространство цемраствором консистенции 0,5. После инъекции скважина выдерживалась в течение трех суток. Холостую часть пьезометрической скважины бурили диаметром 48 мм и цементировали пятиметровыми зонами по общепринятой технологии при давлении 1,5 МПа; последнюю зону длиной 3 м цементировали при давлении 0,5 МПа. Забуривали водоприемник скважины диаметром 48 мм и производили

гидравлическое опробование при давлении 0,6 МПа. Закрывали пьезометр крышкой и монтировали отводящую магистраль, шкаф, КИА.

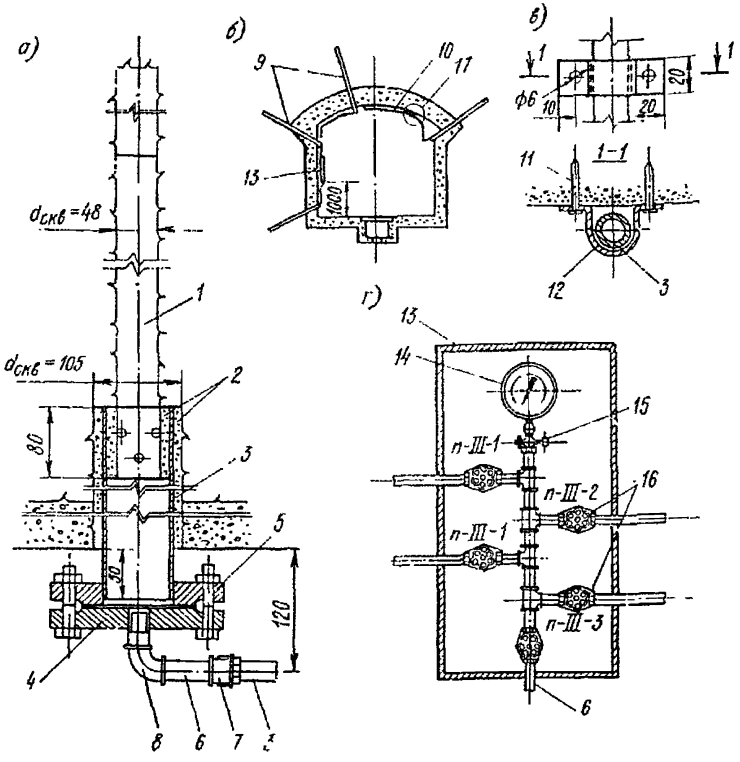


Рис. 6. Размещение пьезометров на участке помещения подъемных механизмов затворов водосброса с глубинным водозабором Нурекской ГЭС (детали). Размеры, мм

а — разрез по пьезометрической скважине; *б* — размещение КИА в туннеле; *в* — узел *А*; *г* — шкаф КИА; *1* — скважина; *2* — цемкамень; *3* — труба; *4* — крышка; *5* — фланец; *6* — патрубок; *7* — муфта; *8* — угольник; *9* — пьезометрическая скважина; *10* — отводящая магистраль; *11* — дюбель; *12* — хомут; *13* — шкаф; *14* — манометр; *15* — кран; *16* — вентиль; *17* — узел *А*.

Приложение 4

ПРИМЕРЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ФИЛЬТРАЦИЕЙ ВОДЫ В ТУННЕЛЯХ

Строительный туннель I яруса Чарвакской ГЭС был отключен 22 декабря 1973 г., а его обследование началось спустя 15 дней. Выходы воды наблюдались в основном в сводовой части туннеля и на стенах (главным образом в межсекционных швах обделки и отдельных незаделанных скважинах укрепительной цементации). Расходы воды по отдельным точкам, как правило,

не превосходили доли литра в секунду и только дебит этих скважин достигал нескольких литров в секунду, а в единичных случаях — 10 — 15 л/с. Всего зафиксировано 60 точек выходов воды. Один из источников около затвора в голове туннеля — в бетонной обделке оголовка туннеля — имел расход 20 — 30 л/с. Напор у источников высокий (струя воды, выходящая через обделку с одной стороны, ударялась в противоположную стенку), и уменьшается в направлении нижнего бьефа. Суммарный приток в туннель достигал 320 л/с. После возведения в туннеле бетонной пробки (в створе примыкания шахтного водосброса) общий фильтрационный приток в туннель составил около 100 л/с.

На Нурекской ГЭС строительный туннель III яруса с подземными помещениями подъемных механизмов и грузовым туннелем к нему расположены несколько в стороне и выше строительного туннеля II яруса в зоне влияния потока, фильтрующегося в обход плотины в левом борту ущелья.

В августе 1977 г. в грузовом туннеле строительного туннеля III яруса на ПК 5+60 произошел прорыв подземных вод через лоток (условная отметка 119,0), в результате чего была взломана бетонная обделка лотка. Расход воды достигал от 0,3 до 1,0 м³/с. Вода стекала в шахту помещения рабочих затворов. Перед этим водохранилище было заполнено до отметки 203,0 (при отметке НПУ 265,0 м) и перекрыта пробка в строительном туннеле II яруса с помощью задвижек в трубах, заложенных в пробке.

В связи с создавшимся положением трубы в пробке строительного туннеля II яруса открыли, и приток воды в грузовой туннель резко сократился. Это указывает на существование гидравлической связи между строительным туннелем II яруса и грузовым туннелем, осуществляемой по сложной межпластовой зоне дробления.

Для изучения возможных притоков по упомянутой зоне дробления в грузовой туннель пробурили 14 скважин так, чтобы они пересекали водообильную зону дробления. Пробуренными скважинами были установлены контуры повышенной водопроницаемости. По этим данным рекомендовали место для шахты, отводящей воду из грузового туннеля в безнапорный участок туннеля III яруса и дренирующей поток подземных вод.

Однако сложность строения межпластовой зоны дробления, наличие на участке многочисленных подземных выработок, отсутствие инструментальных наблюдений за расходами и напорами изливающейся из скважин воды создали значительные трудности в прогнозировании развития фильтрационного процесса.

После бурения скважины в пределах шахты вода изливалась только из трех скважин; приток воды в лоток прекратился. Приток воды в туннель составил не более 20 — 30 л/с.

Однако при перекрытии трубы в пробке туннеля II яруса приток воды вновь достиг 700 — 800 л/с.

Через пройденную шахту может сбрасываться до 1 м³/с воды.

При наполнении водохранилища до отметки 238,0 начались водопроявления в проходимой фурнели в наклонном участке эксплуатационного водосброса с поверхностным водозабором в приконтактной зоне *8* и *9* геологических пачек. При сработке водохранилища до отметки 215,0 м водопроявления в фурнели прекратились.

Интенсивность притока подземных вод в туннель Теребля-Рикской ГЭС после его отключения была проверена опытом: туннель был заполнен водой, дроссельные затворы в начале и конце туннеля закрыты; через несколько часов уровень воды в уравнительной шахте поднялся на 7 м выше уровня воды в водохранилище. В первые годы эксплуатации при опорожнении туннеля приток подземных вод в туннель по замерам составлял 1,5 м³/с [26].

Анализ гидрогеологических условий и расчеты показали, что на центральном участке туннеля, где дренирующее действие склонов и оврагов (ввиду их отдаленности) не может оказать существенного влияния на напорные подземные воды, за обделкой будет избыточный напор подземных вод, что создает благоприятные условия для работы обделки напорного туннеля.

На концевом участке этого туннеля в период эксплуатации произошло обводнение и деформации склона вдоль трассы туннеля по причине образования трещин в бетонной обделке. У сопряжения со стальным трубопроводом образовалась сквозная кольцевая трещина.

В напорных туннелях Дзорагетской ГЭС, ХрамГЭС-2, ТкибулиГЭС образовались поперечные или продольные трещины шириной от нескольких миллиметров до 1 сантиметра [82]. Из-за отсутствия заполнительной цементации в туннелях Канакерской и Ереванской ГЭС произошло образование трещин, что послужило причиной фильтрационных утечек.

Приложение 5

УСТРОЙСТВА И СПОСОБЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕМ И УТЕЧКАМИ ВОДЫ В ТУННЕЛЯХ

Закладной фильтр для определения водопроницаемости обделки (рис. 1) [55]

Устройство, закладываемое в обделку *1* при ее бетонировании включает подводящую трубу *2*, прокладку *3*, сетку *4* и рамку *5*. Подводящая труба имеет с одного конца нарезку или мундштук *6*, на котором в процессе испытания закрепляют шланг *7*, служащий для подачи воды; на другом конце труба *2* открыта и подведена к изогнутой прокладке *3*. Прокладка вы-

полнена из листового коррозионно-стойкого гофрированного материала с отверстиями. Прокладка скреплена с двумя сетками *4*, выполненными из ткани (стекловолокна), пластмассы, коррози-

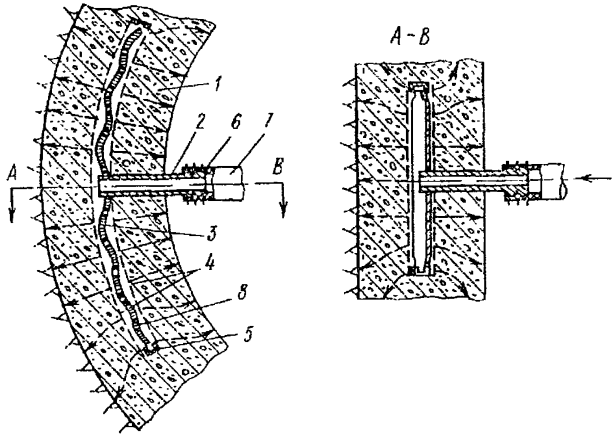


Рис. 1. Устройство для испытания на проницаемость бетонной (железобетонной) обделки туннеля круглого сечения
1 — обделка; *2* — подводящая труба; *3* — прокладка; *4* — сетка; *5* — рама; *6* — мундштук; *7* — шланг; *8* — отверстия.

онно-стойкого металла, металлопласта. Сетка *4* с прокладкой скреплены между собой и по периметру жесткой изогнутой рамой *5*, служащей для закрепления устройства в пространстве, заполняемом бетоном. Размер отверстий сетки назначается с таким расчетом, чтобы препятствовать прохождению сквозь нее зерен цемента при укладке бетонной смеси.

При испытании в устройство нагнетают воду и по величине ее расхода и напора, пользуясь числовым значением переходного коэффициента (полученного, например, методом ЭГДА), определяют величину коэффициента фильтрации.

При испытании обделок на водопроницаемость может оказаться целесообразным применение фильтров других форм, например, в виде цилиндра, многоугольника, многолучевой звезды, диска, шара.

Предложенная конструкция устройства обеспечивает получение направленного фильтрационного потока в обделке (в основном перпендикулярно ее поверхности), что повышает точность эксперимента. По окончании испытания устройство остается в бетоне, а труба *2* закрывается съемной пробкой.

Достоинства устройства: малая его стоимость, незначительность затрат труда на определение коэффициентов фильтрации,

возможность многократных измерений по мере старения бетона, что является особенно ценным с точки зрения установления закономерности изменения водопроницаемости бетона; фильтрационный поток из щелевой полости по направлению близок к радиальному (имеющему место при эксплуатации туннеля).

Недостатки устройства: малость испытуемой площади, невозможность закладки полостеобразователя в готовую обделку.

Щелевая камера (рис. 2) [83]

В опытной подземной выработке *1* при ее строительстве заподлицо с обделкой *2* встраивают фрагменты *3* других обделок, подлежащих испытанию.

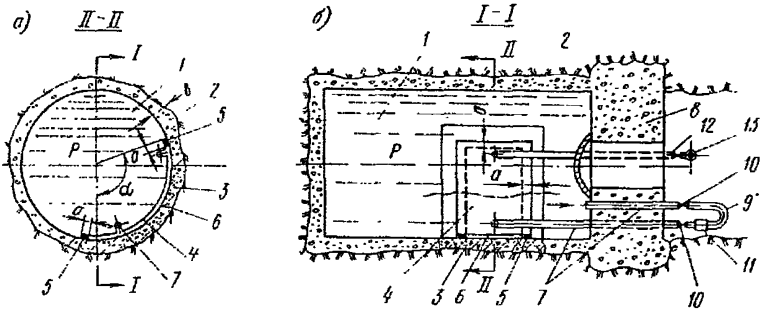


Рис. 2. Щелевая камера в опытной подземной выработке гидравлического загружения

а, б — соответственно поперечный и продольный разрез по выработке; *1* — выработка; *2* — обделка выработки; *3* — фрагмент испытуемой обделки; *4* — непроницаемый лист; *5* — непроницаемый шов; *6* — щелевая камера; *7* — водопроводящая труба; *8* — перемычка; *9* — петля; *10* — вентиль; *11* — водомер; *12* — манометрическая трубка; *13* — манометр.

Фрагмент может быть выполнен в виде кольца или же части поперечного сечения выработки.

Фрагмент перекрывают непроницаемым листом *4*, например, из стали или резины, герметично прикрепленным болтами к обделке швом *5* шириной *a* (при применении стального листа герметичность шва обеспечивают резиновой мягкой прокладкой или другим эластичным материалом). При этом между листом и поверхностью фрагмента обделки образуется щелевая камера *6*. К камере *6* присоединена водопроводящая труба *7*, выведенная через отсеченную перемычку *8* к месту наблюдения. На петле *9* трубы вмонтированы вентили *10* и водомер *11*. Другой конец трубы *7* (после изгиба на петле) выведен также через перемычку к месту наблюдения. Для измерения давления в щелевой камере к последней подключена вторая труба *12*; на свободном конце этой трубы установлен манометр *13*.

Трубы *7*, водомер *11* и вентили *10* имеют такие размеры, чтобы суммарная потеря напора (Δh) при движении воды из зана-

порного участка сооружения в щелевую камеру была достаточно малой по сравнению с напором $h = p/\gamma$, где p — максимальное давление воды в камере в процессе проведения опыта, γ — объемный вес воды.

Чтобы величина протечек воды из выработки в щелевую камеру через шов a была незначительной по сравнению с фильтрацией через обделку из щелевой камеры в породу, ширина шва должна составлять $a \leqslant 0{,}5b$, где b — толщина испытуемой обделки.

Измерение фильтрационного расхода из щелевой камеры производят следующим образом. Закачивают воду под заданным давлением в опытную выработку *1*. При этом вода через трубу *7* и водомер *11* поступает в щелевую камеру *6* и фильтруется через фрагмент *3* испытуемой обделки. Чтобы выпустить воздух из щелевой камеры во время заполнения ее водой открывают вентиль на трубе *12*; после появления воды вентиль закрывают. Измеряют по манометру *13* давление в щелевой камере и по водомеру *11* — расход фильтрующейся воды.

Зная перепад давления, величину фильтрационного расхода и площадь фрагмента испытуемой обделки, определяют ее водопроницаемость (величину коэффициента фильтрации).

С целью экономии времени и средств и улучшения условий сравнимости характеристик обделок, в одной выработке можно одновременно исследовать несколько фрагментов новых типов обделок, применяя несколько щелевых камер и соответствующих им комплектов аппаратуры.

С целью экономии средств, требующихся на строительство опытных камер (учитывая, что стоимость одной камеры достигает нескольких сотен тысяч рублей), щелевую камеру, показанную на рис. 2, можно применить в натурных туннелях и шахтах, встроив фрагмент исследуемой конструкции в обделку туннеля.

Опытный фрагмент и щелевую камеру целесообразно изготавливать в виде кольца диаметром, равным диаметру туннеля. Это позволит исключить продольные швы, параллельные оси туннеля и обеспечит лучшее осреднение результатов опыта благодаря тому, что в испытываемый фрагмент войдут все участки контура обделки: свод, стены и лоток.

В действующих туннелях водопроницаемый лист (пластырь) следует применять достаточно жестким, во избежание повреждения его потоком воды и давлением подземных вод во время опорожнения туннеля.

Пластырь, удовлетворяющий этим требованиям, можно выполнить из тонкой стальной облицовки толщиной 4 — 6 мм с продольными гофрами (рис. 3), закрепленной при помощи сварки к разрезным кольцевым ребрам таврового сечения, выполненным с прорезями напротив гофр. Щелевую камеру в этом случае выполняют следующим образом. При бетонировании обдел-

ки туннеля в нее заделывают тавровые ребра. Затем к поверхности бетона приклеивают широкие профилированные торцовые прокладки из мягкой резины или из поролона с замкнутыми по-

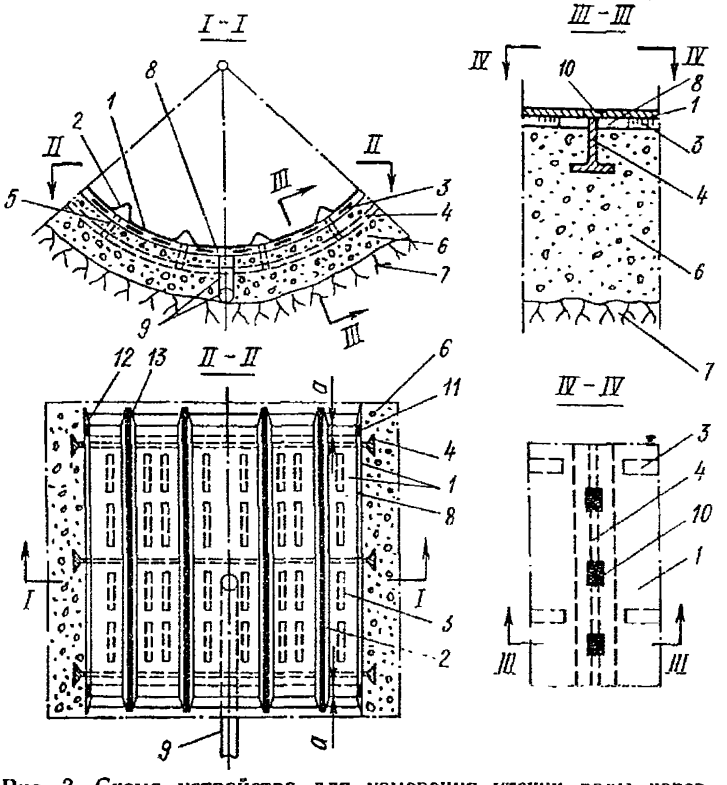


Рис. 3. Схема устройства для измерения утечки воды через выделенную поверхность обделки напорного туннеля во время его нормальной работы

1 — лист стальной; *2* — гофры; *3* — подкладки из полосовой стали, приваренные к листу *1*; *4* — кольцевые ребра *Т*-образного сечения; *5* — прорези в них; *6* — бетонная обделка; *7* — скальная порода; *8* — полая щель между листом и бетонной обделкой; *9* — труба, подающая воду в щель; *10* — сварка; *11* — подкладка, герметизирующая щель; *12* — развальцовка; *13* — обтекатели полуконусные.

рами. В листе *1* напротив ребер рассверливают отверстия под точечную сварку *10*. Лист *1* плотно прижимают к бетонной обделке и прокладкам *11*, которые в местах напротив гофр листа *1* имеют соответствующие утолщения. Через отверстия в листе *1* его приваривают в точках *10* к ребрам *4*. Для лучшего обтекания потоком листа *1* последний по торцам *12* развальцовывают и к гофрам приваривают стальные полуконусные обтекатели *13*, у которых один торец копирует очертание гофры, а другой сходит на нет. В лотковой части обделки помещается труба *9*, по которой в щель *8* поступает расход воды, фильтрующейся через выделенный участок обделки. Труба *9* соединена с концом

трубы, забирающей воду из туннеля и выведенной к месту наблюдения, где (аналогично рис. 2 приложения 5) она имеет петлевой изгиб, снабженный водомером и манометром.

Дифференциальный измеритель трещин (рис. 4) [83]

Измерительное устройство включает рейку *1* со шкалой (например, миллиметровой), на которой надеты подпружиненные движки *2* с нониусами, рейку *3* с прикрепленными к ней сильфонами *4* разной жесткости. На свободных торцах сильфонов закреплены пальцы-зацепы *5*. Крайний палец-зацеп *6* прикреплен непосредственно к рейке *3*. Количество пальцев-зацепов соответствует числу движков на рейке *1*. Соосность пальцев-зацепов с сильфонами фиксируется скобами *7*, прикрепленными к рейке *3*. Рейки *1* и *3* крепятся к колкам *8*, заделанным в обделку *9* сооружения на расстоянии l_0 друг от друга, на котором производится измерение величины раскрытия трещин *10*.

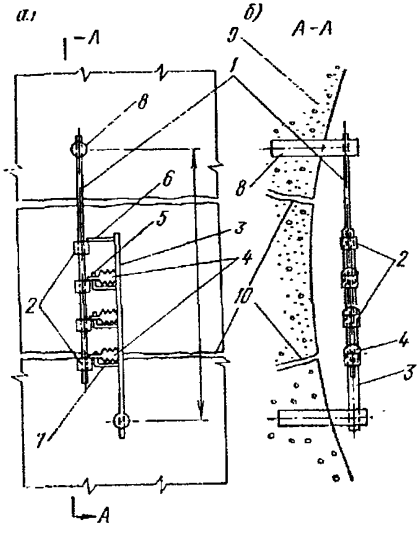


Рис. 4. Дифференциальный измеритель трещин

а — вид на измеритель, установленный на стенке опытной камеры; *б* — поперечный разрез по камере, *1* — рейка со шкалой; *2* — движки; *3* — рейка с сильфонами; *4* — сильфоны; *5* — пальцы-зацепы; *6* — крайний палец; *7* — скоба; *8* — колки.

При установке измерителя на место рейки *1* и *3* крепят к колкам *8* так, чтобы они были параллельны между собой, а движки *2* касались пальцев-зацепов *5*. После снятия показаний местоположения движков относительно шкалы на рейке производят занапоривание камеры (туннеля). Давление в камере (туннеле) поднимают ступенями; количество ступеней давления соответствует количеству движков на рейке *1*, а величина давления на каждой ступени соответствует жесткости одного из сильфонов. В связи с этим сильфоны подбирают таким образом, чтобы напряжения в них не превосходили предела упругости. Для получения требуемой осевой жесткости сильфонов внутрь их можно вставлять спиральную пружину.

При достижении в штольне давления p_1 один из сильфонов укорачивается по оси на величину, при которой палец-зацеп выходит из соприкосновения с движком, сдвинутым на величину Δ_1, соответствующую величине раскрытия трещин при данном дав-

ления. При поднятии давления до величины p_2 происходит отклонение второго движка, зафиксировавшего величину раскрытия трещин Δ_2 и т. д. При этом благодаря наличию нониусов перемещения фиксируются с точностью до 0,1 мм. После окончания испытания визуально определяют количество образовавшихся трещин n в пределах базы l_0. Тогда, поделив величину раскрытия трещин Δ на число n, получают среднюю величину раскрытия трещин.

Максимальный трещиномер (рис. 5)

Трещиномер включает штангу *1*, вставленную в отверстия *2* в опорах *3*. Штанга *1* на одном конце имеет упор *4*, а на другом конце — продольную прорезь *5*. Опоры *3* заделаны в обделку *6*,

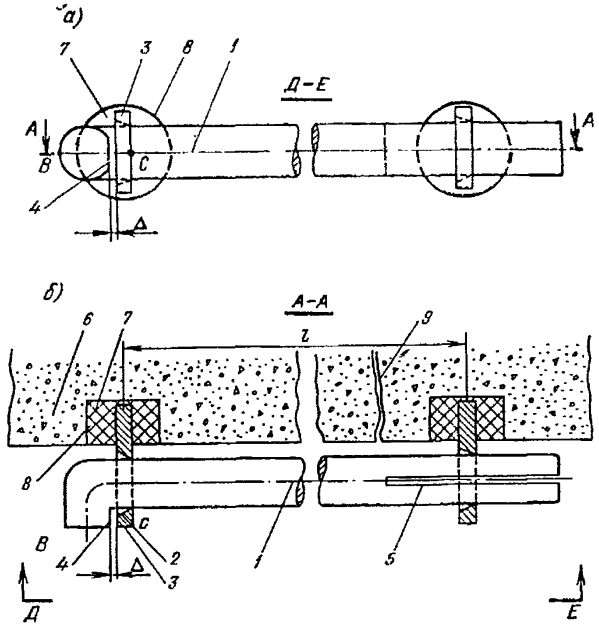


Рис. 5. Устройство для измерения трещин в обделке подземного сооружения

1 — штанга; *2* — отверстие; *3* — опора; *4* — упор; *5* — прорезь; *6* — обделка; *7* — цементный раствор; *8* — цилиндрическое отверстие.

например, цементным раствором *7*, заполняющим цилиндрические отверстия *8*. Опоры *3* заделаны на расстоянии *l* друг от друга, на котором производится измерение величины трещины *9*. Поверхности штанги *1* с упором *4* и опор *3* с отверстиями *2* при изготовлении их из стали должны быть защищены от коррозии, например, оцинкованы или залужены. Концевой участок штанги

1, пока она не вставлена в опору *3*, имеет на длине прорези *5* диаметр, несколько больший, чем диаметр отверстия *2* в опоре *3*, что осуществляют раздвижением полуцилиндрических элементов штанги *1*. Когда штанга *1* вставлена в опоры *3*, возникает поперечная сила P распора между концевой частью штанги *1* и соответствующей опорой *3*.

Перед измерением штанга *1* вставляется в отверстия *2* в опорах *3* так, чтобы упор *4* вплотную был придвинут к опоре *3*. Посредством микрометра или мессуры измеряют расстояние a_1 между точками B и C.

Затем поднимают давление в туннеле до заданной величины p и, если в пролете l между опорами *3* образуется в обделке n трещин с суммарным раскрытием Δ_p, то расстояние между опорами увеличивается на величину Δ_p. Одновременно штанга *1* благодаря наличию упора *4*, вплотную придвинутого к опоре *3*, переместится на ту же величину только относительно опоры *3*, находящейся со стороны того конца штанги *1*, в котором имеется прорезь *5*.

После опорожнения туннеля благодаря тому, что сила трения между концевым участком (со стороны прорези *5*) штанги *1* и опорой *3*, вызванная наличием силы P, значительно больше силы трения между участком штанги *1* со стороны упора *4* и опорой *3*, упор *4* передвинется относительно опоры *3* так, что расстояние между точками B и C увеличится на величину $\Delta_p - \Delta_0$ и станет равным $a_2 = a_1 + \Delta_p + \Delta_0$, где Δ_0 — суммарное (остаточное) раскрытие трещин после опорожнения туннеля. Отсюда имеем $\Delta_p = a_2 - a_1 + \Delta_0$.

Величину Δ_0 определяют с помощью переносного портативного микроскопа или лупы, снабженных шкалой с делениями.

Имея три измеренные величины a_1, a_2, Δ_0, подсчитывают по предыдущей формуле величину Δ_p. Подсчитывают число трещин в этом пролете и средние величины раскрытия трещины: максимального $\delta_p = \Delta_p/n$ и остаточного $\delta_0 = \Delta_0/n$.

Знание обеих величин δ_p и δ_0 является важным для суждения о фактической работе обделки туннеля в отношении утечек, долговечности и статической устойчивости.

Если принять величину l небольшой, например, равной 1/20 длины окружности поперечного сечения обделки πD_0, где D_0 — диаметр туннеля в свету, то, как правило, величина n будет равна единице и это позволит более достоверно определить максимальное и остаточное раскрытие каждой трещины в исследуемом поперечнике туннеля.

Если исследуется эксплуатируемый напорный туннель, то во избежание повреждения потоком воды данных устройств, их следует защитить кожухом, а чтобы он не создавал дополнительных гидравлических сопротивлений (потерь напора), целесообразно устроить в обделке кольцевое углубление, установив в нем гуськом (цепочкой) все устройства, а углубление закрыть

съемной крышкой, расположенной заподлицо с поверхностью обделки. При расположении устройства цепочкой следует применить сдвоенные опоры (рис. 6).

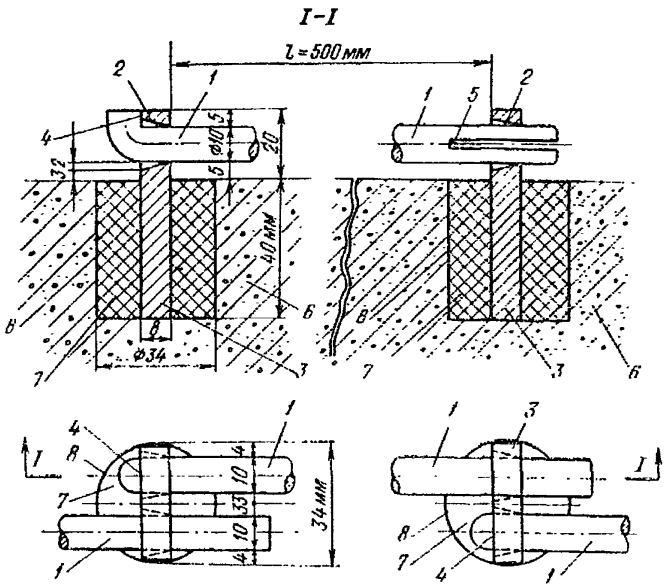


Рис. 6. Цепочка устройств со сдвоенными опорами для измерения раскрытия трещин в обделке сооружения

1 — штанга; *2* — отверстие; *3* — сдвоенная опора; *4* — упор; *5* — прорезь; *6* — обделка; *7* — цементный раствор; *8* — цилиндрическое отверстие.

Перископ (рис. 7) [83]

С помощью перископа в камере гидравлического опробования можно осмотреть любую точку обделки и оптическим путем определить число n и ширину δ раскрытия трещин.

Такой перископ при длине луча 20 — 40 м позволит определить величину раскрытия трещин δ в бетонной обделке с ошибкой, не превосходящей примерно 0,2 мм. Для этого на внутренней поверхности плоского стекла объектива наносят шкалу аналогично геодезическому дальномеру с делением через 0,1 или 0,2 мм (в зависимости от светосилы подзорной трубы и длины опытной камеры). Для освещения трещины предусматривают электрические лампы, расположенные внутри или снаружи трубы перископа.

В качестве подзорной трубы можно использовать оптическую трубу от геодезического инструмента, например, нивелира.

Во время наблюдений расстояние от объектива до поверхности обделки должно быть не более 0,2 — 0,3 м.

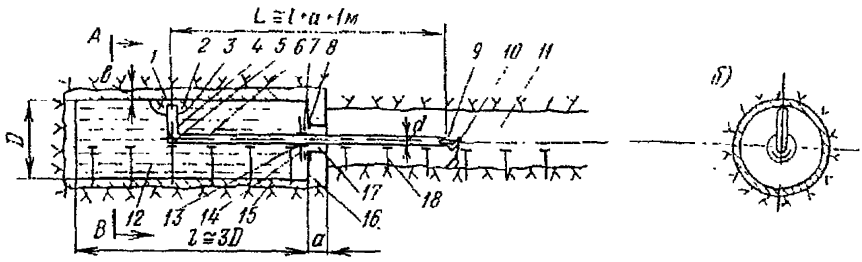


Рис. 7. Устройство для наблюдения за трещинами в обделке в процессе гидравлического испытания опытных камер/

1 — объектив с прозрачным герметическим стеклом; *2* — лампочка электрическая низковольтная; *3* — рефлектор; *4* — труба (a=50—80 мм) металлическая; *5* — зеркало (под углом 15° к оси трубы); *6* — труба (d=50—80 мм) металлическая; *7* — прокладка резиновая кольцевая; *8* — фланец стальной; *9* — оптическая труба (например, от нивелира прецизионного типа НА-1); *10* — наблюдатель; *11* — выработка подходная; *12* — вода под давлением p; *13* — патрубок с уплотняющими резиновыми кольцами или с сальниковой набивкой, *14* — крышка стальная; *15* — испытываемая обделка; *16* — пробка железобетонная; *17* — лаз (проход для персонала); *18* — стойка с сегментной подставкой.

Примечание. Не изображены трубы для подачи воды в камеру и выпуска ее после испытаний, а также устройства для продольного передвижения трубы 6 и ее поворота вокруг оси.

Определение утечек воды из длинных отсеков водоводов

Для испытаний на утечку Сиднейский напорный туннель (Австралия) был разделен на 6 секций разделительными перемычками, состоящими из стальных литых дверок, встроенных в железобетонные кольца. Длина каждой секции достигала 4 км.

В туннеле Дзорагетской ГЭС для испытания на утечку под напором был выделен участок длиной 350 м; к стенкам туннеля было прикреплено по бетонному кольцу, отверстие каждого кольца закрывалось кольцевой крышкой, а затем сплошной крышкой.

В туннеле Гизельдонской ГЭС аналогичные испытания были выполнены А. А. Ничипоровичем на двух участках: один между двумя железобетонными перемычками, другой между перемычкой и затвором.

Данный способ применялся и на других туннелях, в числе которых много зарубежных. Он применялся при испытаниях водоводов и со стальной облицовкой, забетонированной в породу. В таких водоводах временную перемычку устраивают в виде металлической пробки с формой усеченного конуса, приваренной к облицовке [84].

Недостатки способа: а) значительная трудоемкость и продолжительность по времени, так как для реализации способа необходимо построить две герметические перемычки и после проведения опыта их удалить; б) в связи с большими трудностями, связанными с применением данного способа, длину испытуемых участков принимают большой, что исключает возможность опре-

деления мест сосредоточенной фильтрации воды из туннеля; в) занапоривание испытуемого отсека осуществляют при опорожненных смежных участках водовода, расположенных выше и ниже по течению. Вследствие этого искажается фильтрационное поле вокруг испытуемого участка водовода по сравнению с полем фильтрации, устанавливающимся в период нормальной эксплуатации водовода.

Определение утечек воды из коротких отсеков водовода

Для сокращения затрат и ускорения подготовительных работ обычно принимают большую длину L, равную нескольким сотням метров, а при длинных туннелях и нескольким километрам.

Для выявления локальных дефектов в обделке могут быть применены устройства, выполненные в виде двух, связанных между собой на расстоянии 7 — 8 м, заглушек, одна из которых снабжена лазом. Особенно тщательно следует уплотнять шов между заглушками и облицовкой.

Для этого используется эластичный битумный шнур диаметром 30 — 35 мм. После зачеканки шов промазывается горячей битумной мастикой. Эти операции производятся изнутри отсека, затем рабочие покидают отсек и лаз плотно заваривается. Предусматривают упор, препятствующий выжиманию битума наружу. В отсек по трубе подается вода под давлением, равным рабочему давлению в туннеле. Опыт рекомендуют вести до стабилизации величины утечки (24 — 48 ч).

Видоизменением этого способа является способ кольцевой щелевой камеры, предложенный и реализованный Г. П. Завриевым при строительстве напорного туннеля Ереванской ГЭС (рис. 8). Для проведения опыта был выделен отсек обделки *1*

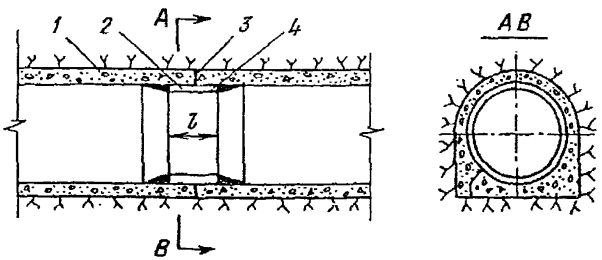


Рис. 8. Схема к измерению утечек воды из кольцевого отсека водовода

1 — обделка водовода; *2* — металлическое кольцо; *3* — поперечный шов бетонирования; *4* — кольцевая щелевая камера.

небольшой длины l, включающей поперечный шов *3* бетонирования.

Определение утечек воды с помощью пристенной камеры (рис. 9)

Этот способ предложен и применен Г. П. Завриевым для оценки величин утечек воды через обделку туннеля и главным образом через продольные швы обратного свода. В этом способе на участке длиной 13 м в направлении оси туннеля была сооружена вертикальная железобетонная (продольная) стенка, отстоящая от поверхности обделки на 1,6 м; вместе с торцовыми поперечными вертикальными стенками, примыкающими к этой продольной стенке и к бетонной обделке туннеля, образована П-образная в плане перегородка. Перегородка имела такую высоту (4,2 м), чтобы ее верхний край находился немного выше рабочего уровня воды в туннеле. С помощью насоса или от водопроводной сети заполняется водой до этого уровня емкость, образованная перегородкой; уровень воды поддерживается постоянным, а подаваемый для этого расход воды, фиксируемый расходомером, характеризует искомую величину утечки. Сама перегородка и шов по месту ее примыкания к обделке имели водо-

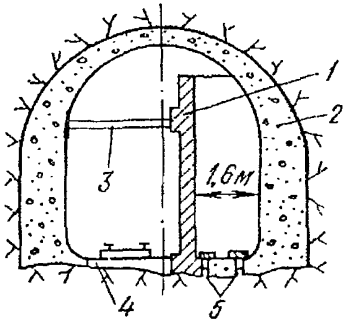


Рис. 9. Схема к измерению утечек воды из отсека туннеля, выделенного П-образной в плане перегородкой

1 — перегородка; *2* — бетонная обделка; *3* — распорки из рельсов; *4* — бетонные распорки; *5* — швы продольные.

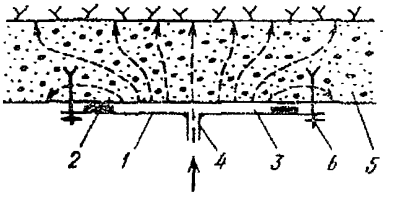


Рис. 10. Схема к измерению водопроницаемости обделки туннеля нагнетанием воды в щель, устроенную на поверхности обделки

1 — пластина стальная; *2* — прокладка резиновая; *3* — полость щелевая; *4* — штуцер для нагнетания воды; *5* — бетонная обделка; *6* — болты с гайками.

проницаемость, пренебрежимо малую по сравнению с водопроницаемостью испытуемой части обделки, заключённой внутри П-образной перегородки.

Определение проницаемости обделки стен с помощью накладного щита (рис. 10)

В безнапорном туннеле, с помощью стальной пластины *1* размером 0,5×1,5 м и герметизирующей прокладки *2* из резины устраивается щелевая полость *3*, в которую через штуцер *4* нагнетается вода. По величине напора и расхода нагнетаемой воды, пользуясь числовым значением переходного коэффициента, по-

лученным методом ЭГДА, определяют искомый коэффициент фильтрации k бетонной обделки 5 туннеля.

Достоинства способа: малая стоимость устройства и незначительность затраты труда на определение k.

Недостатки способа: малость площади, огороженной для испытания, поэтому способ не обеспечивает выявления всех слабых мест в обделке; неполное соответствие направления линий тока в опыте и в натуре (по нормали к поверхности обделки); необходимость заделки в бетон большого количества крепежных болтов 6, которые должны быть удалены перед введением туннеля в работу; невозможность повторных испытаний при занапоренном туннеле, когда будет иметься еще и противодавление фильтрационного потока на поверхность обделки, примыкающую в породе.

Способ определения водопроницаемости бетонных обделок по водопоглощению пробуренных в них скважин (рис. 11)

В обделке пробуривают скважину глубиной 10 см и более в зависимости от толщины бетона. В скважину вводится инъектор 2 с присоединенным шлангом 3 от водонагнетательного ручного насоса 4. Насосом качают воду из сосуда 6, установленного на весах. С момента стабилизации заданного давления, определяемого по манометру 5, фиксируют время, в течение которого бетон поглощал воду с расходом, определенным с помощью весов. По этим данным вычисляют величину k. Способ был применен при испытании обделки напорного туннеля Ереванской ГЭС.

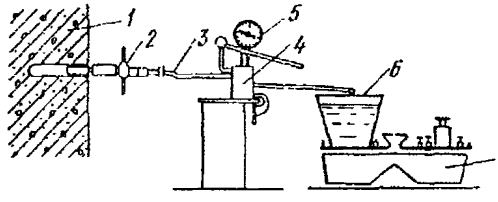


Рис. 11. Схема установки для определения водопроницаемости бетонной обделки
1 — бетонная обделка; *2* — инъектор; *3* — шланг; *4* — насос; *5* — манометр; *6* — сосуд с водой.

Достоинства способа: малая стоимость устройства, незначительность затрат труда на определение величины k.

Недостатки способа: малость испытуемого объема бетона, основное направление фильтрационного потока из скважины (перпендикулярное ее оси) отклоняется на 90° от направления фильтрации в обделке при занапоренном туннеле, следовательно, величина k может отличаться из-за анизотропии бетона обделки по водопроницаемости.

Способ оценки водопроницаемости бетонных обделок по отсосу воздуха из бетона (рис. 12) [72]

На поверхность обделки накладывается колпак; внутри колпака с помощью ручного вакуумнасоса создается вакуум, бла-

годаря которому фланец колпака через мягкую резиновую прокладку присасывается к поверхности обделки. Создав заданную величину разрежения, вакуум-насос отключают и по времени восстановления давления воздуха, отсасываемого из бетона, с помощью тарировочного графика определяют величину k.

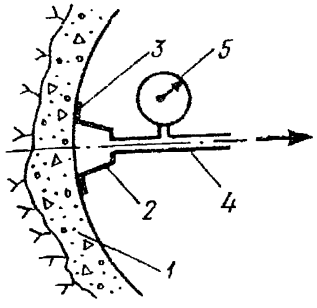


Рис. 12. Схема устройства для определения водопроницаемости бетонной обделки

1 — бетонная обделка; *2* — резиновый толстостенный колпак; *3* — фланец колпака с мягкой резиновой прокладкой; *4* — трубка резиновая вакуумная, подключенная к вакуум-насосу (не показан на рисунке); *5* — вакуумметр.

Достоинства способа: малая стоимость устройства, незначительность затраты труда на определение величины k, вода не требуется.

Недостатки способа: малость испытуемого объема бетона (испытывается только близкий к поверхности тонкий слой бетона), малая точность испытания из-за того, что вместо воды используется воздух, поскольку на искомую величину k сильно влияет влажность бетона.

Определение раскрытия и проницаемости отдельных трещин

Для этого можно применить способ и устройство (рис. 13), предложенные В. Н. Жиленковым [17]. Однако этим способом нельзя определить проницаемость трещин, выходящих на поверхность скального массива.

Для этой цели можно применить устройство, показанное на рис. 14, с помощью которого над трещиной скального массива или бетонного сооружения образуют напорную камеру шириной $l_2 = d$; перекрывая по обе стороны от камеры трещину на длину $l_1 = 2d$, нагнетают в камеру воздух при постоянном избыточном давлении, создающем ламинарный режим движения воздуха в трещине, измеряют расход воздуха и определяют коэффициент проницаемости трещины $c_{тр}$, см^3, по формуле

$$c_{тр} = a\eta \frac{Q}{p}, \text{ при } p \leqslant 10^5 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2} \cong 0{,}1 \text{ ат (0,01 МПа)},$$

где a — безразмерный коэффициент 1,37 при $l_1 = 2d$; η — динамическая вязкость воздуха, пуаз (1 пуаз = 1 г (масса)/см·с); Q — расход воздуха, см^3/с; p — избыточное давление воздуха в камере, дин/см^2 $\left(1 \text{ дин} = 1 \frac{\text{г(масса)} \cdot \text{см}}{c^2}\right)$.

Определение в период эксплуатации утечек воды, приходящихся на всю длину водовода

При осуществлении этого способа (рис. 15) перекрывают затворы низовой *6* (например, перед агрегатом гидроэлектростан-

ции) и верховой 2 (на водоприемнике) и измеряют расход воды, поступающей в подводящий туннель 4 через перепускное (байпасное) устройство 3 с расходомером из входа в туннель.

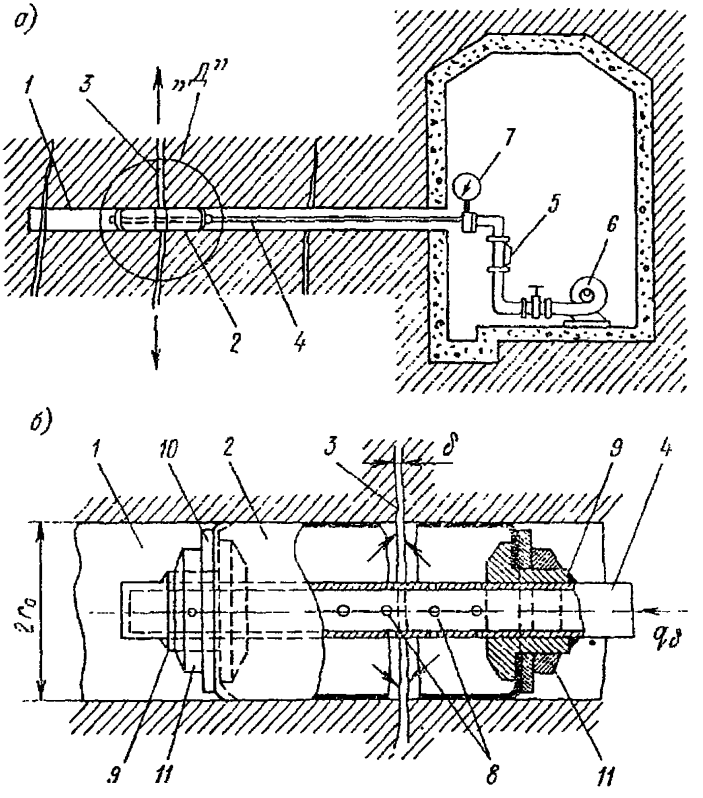


Рис. 13. Схема эксперимента по определению раскрытий трещин в скальном массиве

1 — скважина; *2* — эластичный баллон; *3* — трещина; *4* — подводящая трубка с заглушкой на конце; *5* — расходомер; *6* — насос; *7* — манометр; *8* — отверстия для выхода воды внутрь баллона; *9* — втулки, приваренные к подводящей трубке; *10* — кольцевой диск; *11* — гайки, навинчивающиеся на втулки.

При наличии уравнительной шахты *8* (рис. 15, *б*) суммарная утечка воды из примыкающего к ней занапоренного туннеля *4*, при закрытых затворах *2*, *6* по его концам, может быть измерена по изменению уровня воды в уравнительной шахте *8*.

Величину суммарной утечки, когда она велика, можно измерить при наличии аэрационной трубы *9* (рис. 15, *в*) с помощью гидрометрической вертушки *10*, пропущенной на штанге *11* внутрь туннеля *4*; при этом входной затвор открыт, а низовой *6* — закрыт. Например, при определении утечки из напорной деривации Ткибульской ГЭС в аэрационную трубу водоприемника опускалась строго ориентированная в плане жесткая штанго-

вая система с вертушками на нижней секции штанги. Последняя опускалась до упора в дно, и измерения велись в фиксированных положениях штанги последовательными ее поднятиями.

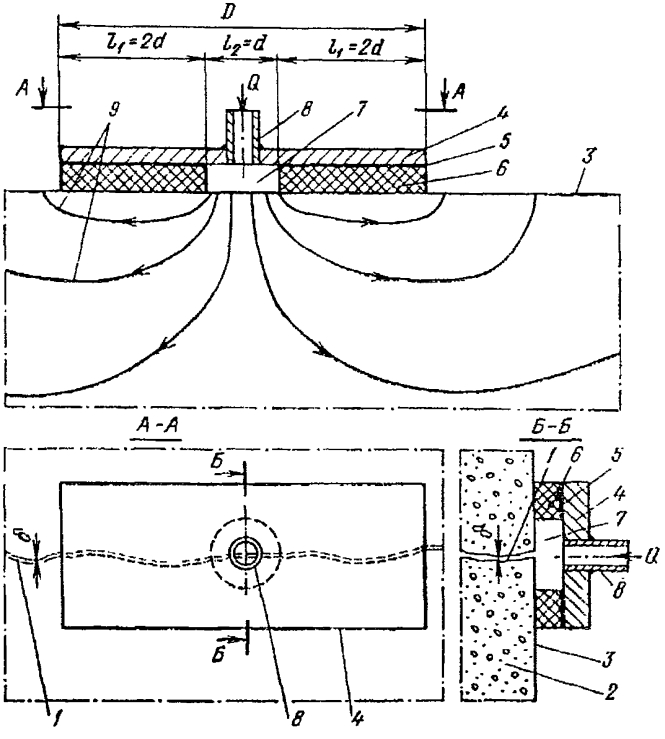


Рис. 14. Способ и устройство для определения коэффициента проницаемости трещин

1 — трещина; *2* — скальная порода или бетон; *3* — открытая поверхность; *4* — пластина; *5* — клей; *6* — эластичная прокладка; *7* — камера; *8* — патрубок; *9* — схематический вид линий тока нагнетаемого воздуха.

При строительстве и эксплуатации ГЭС Каунерталь (Австрия) проводились исследования потерь на фильтрацию из 13-километрового туннеля на деривационной ГЭС, пройденного в скальных породах различного литологического состава — сланцах, гранито-гнейсах, диабазах, амфиболитах и кварцитах.

Расчетное внутреннее давление воды в начале туннеля предусматривалось равным 1,02 МПа, в конце — 1,58 МПа, а с учетом динамического воздействия достигало 1,76 МПа.

Степень трещиноватости и возможность фильтрационных потерь оценивалась на основании анализа водопритока в туннель.

Произведено опрессование туннеля при расчетных давлениях, когда не производилось работ по его обделке, и установле-

на необходимость проведения дополнительных мероприятий, сокращающих потери воды.

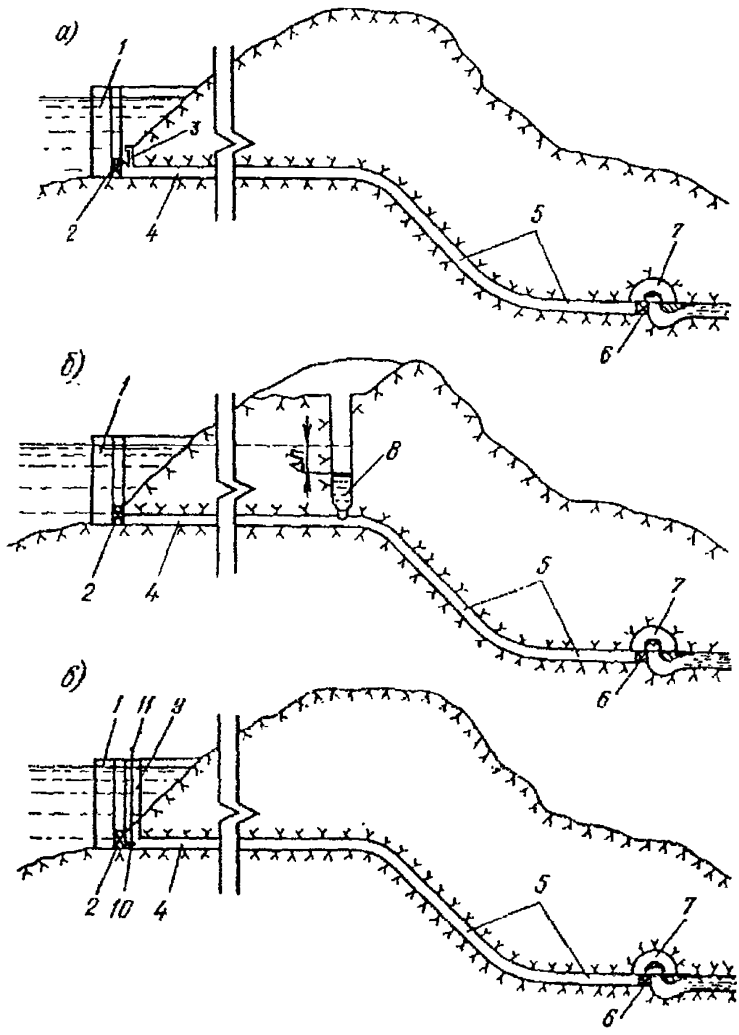


Рис. 15. Схемы к измерению суммарных утечек воды из напорного водовода

а — с использованием перепускного устройства; *б* — с использованием уравнительной шахты; *в* — при помощи гидрометрических вертушек; *1* — водоприемник; *2* — верховой затвор; *3* — перепускное (байпасное) устройство; *4* — подводящий туннель; *5* — турбинный водовод; *6* — низовой затвор; *7* — здание ГЭС; *8* — уравнительная шахта; *9* — аэрационная труба; *10* — вертушка; *11* — штанга.

Опытное опробование туннеля с обделкой, а также гидрогеологические наблюдения в течение 5 лет эксплуатации ГЭС, свидетельствуют о надежной работе подводящего туннеля.

Основным недостатком этого способа является невозможность определения мест утечки воды из водовода по его длине. Способ позволяет определить лишь суммарную величину филь-

грационного расхода. Вместе с тем может оказаться, что вода поступает сосредоточенно в одном или нескольких участках водовода, и иногда это может вызвать серьезные последствия.

Указанный недостаток можно частично устранить, применив способ определения утечек из длинных отсеков водоводов.

Определение утечек воды из длинных участков водоводов, образуемых диафрагмами

Если диафрагмы установить в местах, где имеются существенные изменения геологической структуры породы или трещиноватости, то можно определить потери на каждом участке между двумя диафрагмами, которые равны разности между величинами потерь, измеренных по верховой и низовой диафрагмам.

Подобные деревянные диафрагмы с отверстиями для измерения расхода и пропуска через них воды, фильтрующейся через обделку позади находящегося участка водовода и через неплотности низового затвора, в Европе именуются щитами Монтанье. Зазор между щитом и бетонной обделкой туннеля устраняется забивкой деревянных клиньев и зачеканкой джутовым шнуром, пропитанным битумом. С помощью щитов Монтанье были испытаны на фильтрацию через обделки многие зарубежные напорные туннели. Особого внимания заслуживают результаты испытания этими щитами напорного туннеля Розелан-Бати во Франции (длина туннеля 13 км, диаметр 4,8 м, заглубление 400 — 600 м, напор в начале туннеля составляет 116, а в конце — 163 м, расход 50 м³/с). При испытании наполнение туннеля было осуществлено из водохранилища Розелан при расходе 0,5 м³/с, причем конец туннеля был заглушен металлической перегородкой, внутри туннеля было установлено 4 диафрагмы (щиты Монтанье с вертушками в их отверстиях) и 9 электромагнитных расходомеров [67].

Положительным качеством этого способа является его большая точность, так как утечки измеряют по всей длине водовода, когда при рабочем напоре имеет место установившаяся фильтрация из водовода.

Недостатком описанных диафрагм является их громоздкость и несовершенство конструкции, особенно в отношении кустарности и ненадежности уплотнения по контуру примыкания щита к обделке водовода. Это затрудняет монтаж и демонтаж диафрагм, требует больших затрат труда и времени, а главное неудобство — необходимость опорожнения водовода при испытании каждого последующего участка водовода, потому что деревянную диафрагму типа щита Монтанье нельзя передвигать в запаренном водоводе в новую позицию. Из-за этих недостатков с помощью таких диафрагм практически невозможно выявить очаги сосредоточенной фильтрации или же убедиться в их отсутствии при большом числе коротких участков трассы водовода.

Определение утечек воды из занапорешных водоводов с помощью передвижных устройств

Применение передвижных устройств (тампонов) для определения мест утечек из водоводов известно в водоснабжении, где для этой цели пользуются резиновым шаром.

Тасманская гидроэлектрическая компания в Австралии сконструировала машину «трубопроводный дикобраз» для очистки трубопроводов диаметром до 2,2 м. Эта машина состоит из двух цилиндрических корпусов с прикрепленными к ним нейлоновыми щетками. Машина приводится в действие током воды. Опыт эксплуатации этой машины подтверждает возможность использования тока воды для передвижения перегораживающего устройства, служащего для измерения утечек воды из напорных гидротехнических туннелей и шахт.

На рис. 16 показана принципиальная схема исследования подземного водовода на проницаемость с применением передвижного устройства. Для реализации этого способа перекрывают затворы *1* в конце турбинного водовода *2* и освобождают водоприемник *3* в голове подводящего туннеля *4* от сороудерживающей решетки *5*.

Доставляют к водоприемнику с помощью катера отсекатель *6* и погружают его на порог водоприемника. Процесс погружения можно контролировать с помощью водолазов, телевизионной установки или специальной малогабаритной подводной лодки (на глубинах недоступных для водолазов) Применение подводной лодки в области гидротехники описано, например, в [85], где приведен пример использования лодки для наблюдения за состоянием плотины. В рассматриваемом случае лодку можно применить с манипулятором (механической рукой). После погружения отсекатель заводят в туннель и присоединяют его к трособлочной системе 7, на тросах которой имеются указатели длины. Перемещают отсекатель в заданное место и герметизируют его с обделкой туннеля с помощью дистанционно управляемых уплотняющих элементов. Перемещение отсекателя осуществляют при помощи тока воды в туннеле, регулируемого концевым затвором, или при помощи троса, пропущенного через уравнительную шахту при ее наличии. Замеряют расход воды, поступающей через водомер в отдаленный отсек *6* туннеля длиной *L*. Вычитая из полученного расхода величину протечек воды через концевой затвор *1*, получают значение расхода воды, фильтрующейся через обделку в породу.

С помощью трособлочной системы перемещают отсекатель в новое положение и повторяют вышеописанные операции. Аналогично можно проводить измерение утечек в уравнительной шахте *8* (рис. 16).

По окончании измерений устройство поднимают наверх и извлекают на сушу.

По полученным значениям расхода воды через водомер строят эпюру фильтрационных утечек воды.

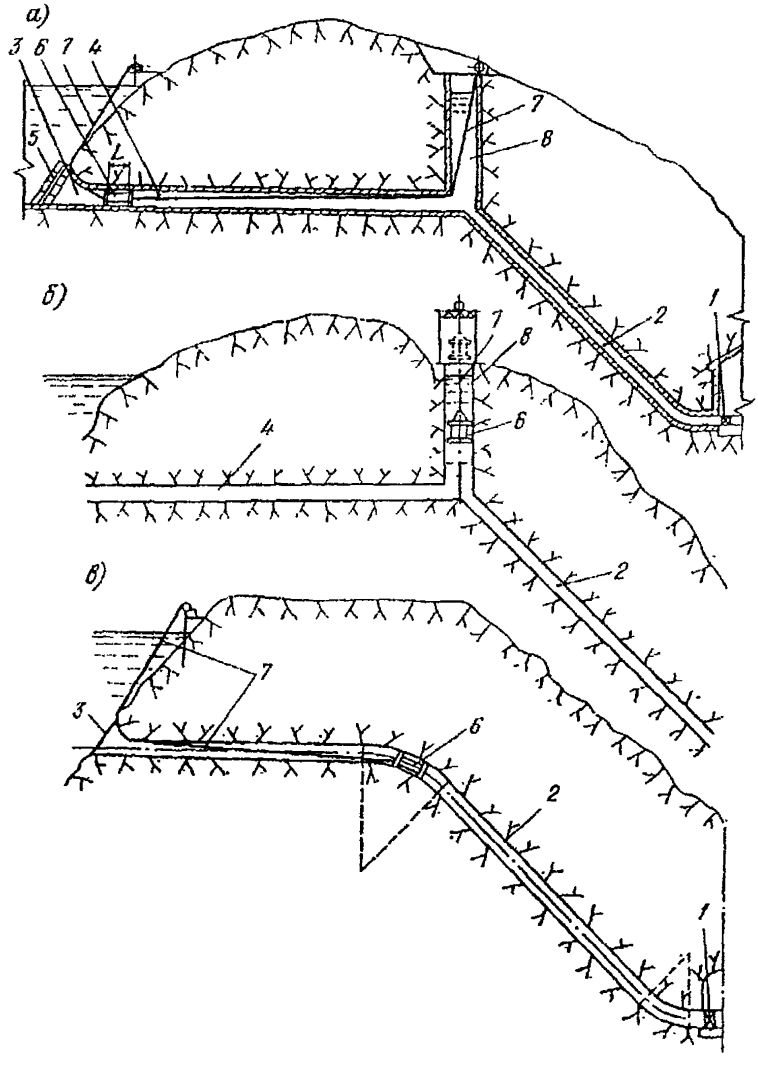


Рис. 16. Измерение утечек воды из подземных напорных водоводов

а, б, в — измерение утечек соответственно из подводящего туннеля, уравнительной шахты и турбинного водовода; *1* — затвор; *2* — турбинный водовод; *3* — водоприемник; *4* — подводящий туннель; *5* — сороудерживающая решетка; *6* — отсекатель; *7* — трособлочная система; *8* — уравнительная шахта.

В результате проведенных измерений получают реальную картину утечек воды из туннеля по всей его длине при эксплуатационном напоре в нем и эксплуатационном режиме подземных вод.

Для реализации описанного способа могут быть использованы передвижные устройства, схематически показанные на рис. 17.

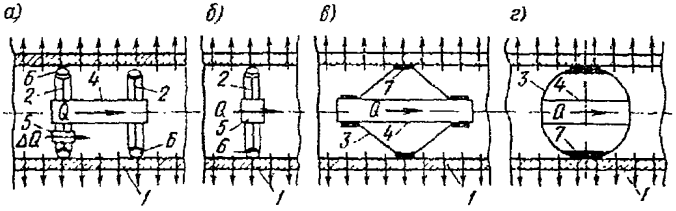


Рис. 17. Схемы передвижных устройств для выявления мест утечек и их величин в занапорением тунпеле при эксплуатационных условиях

а — двойная диафрагма; *б* — одинарная диафрагма; *в* — эластичная диафрагма (с эластичными обручами) двухконусная; *г* — эластичная диафрагма шаровая; *1* — обделка тунпеля; *2* — диафрагма жесткая; *3* — диафрагма эластичная; *4* — труба с водомером; *5* — патрубок с водомером, *6* — эластичная уплотнительная камера; *7* — эластичное уплотнительное кольцо; *Q* — расход воды на утечку через обделку водовода и неплотности низового затвора; *ΔQ* — расход воды на утечку через участок обделки, выделенный двойной диафрагмой; вертикальные стрелки показывают направление движения воды из занапоренного водовода через обделку в породу.

Устройство для дифференциального измерения утечек из напорного водовода

Это устройство (рис. 17, *а*) [76] включает два диска-фланца, соединенных между собой центральной прямоточной трубой и перпметральными трубами-поплавками. В центральной части фланцев имеются отверстия, диаметр которых равен внешнему диаметру прямоточной трубы.

Ободы фланцев в поперечном сечении выполнены по дуге окружности. На ободы надеты уплотнительные элементы — резиновые камеры. В верхней части камер имеются воздуховыпускные штуцеры, снабженные редукционными клапанами. В нижней части камеры соединены друг с другом шлангом или трубой.

По внешней грани одного из дисков прикреплен водяной насос с реверсивным электродвигателем, установленным в герметичном корпусе. Насос при помощи трубки соединен с камерой. На трубке установлен редукционный клапан. К электродвигателю насоса подключен кабель, выведенный на пульт управления.

В верховом фланце врезан водомерный патрубок, на входе в который закреплена полусферическая решетка. Внутри патрубка вмонтирована вертушка в виде двухлопастного пластмассового пропеллера, вращающегося на оси, заделанной в крестовине, которая прикреплена к патрубку.

На концах лопастей вертушки имеются контакты из электропроводного материала, соединенные между собой изолированным электрическим проводником.

Внутренняя поверхность на участке расположения вертушки покрыта электроизоляционным слоем, на котором в створе вер-

тушки закреплены два диаметрально противоположных контакта; контакты соединены кабелем с пультом управления, расположенным на поверхности земли.

К периметральным трубам прикреплены направляющие кронштейны с резиновыми роликами.

К выступающим концам прямоточной трубы прикреплены тяги, к которым присоединяют тросы для управления устройством. Тросы имеют разметку для определения расстояний во время проведения измерений утечек. К одному из тросов прикреплены электрокабели.

Благодаря наличию гидравлической связи (через прямоточную трубу) верхнего бьефа с нижним, вода с минимальными потерями напора свободно протекает через устройство и компенсирует утечки на участке между устройством и концевым затвором водовода. Ввиду малости величина перепада давления воды в водоводе (перед устройством и за ним) фильтрационное поле в горном массиве на участке местоположения устройства остается таким же, как и во время нормальной эксплуатации сооружения, что обеспечивает высокую точность измерения утечек воды.

После нагнетания воды в уплотнительные камеры и их плотного прижатия к обделке водовода на участке между дисками-фланцами образуется замкнутое пространство (ограниченное внутренней поверхностью обделки, внешней поверхностью прямоточной трубы и внутренними плоскостями фланцев), соединенное с полостью водовода через водомерный патрубок.

В случае наличия в обделке водовода каких-либо дефектов или повреждений (наличие трещин, неплотных строительных швов, участков непроработанного бетона) вода из указанного замкнутого пространства (передвижной опытной камеры гидравлического загружения) будет фильтроваться в породу, фильтрационный расход из камеры будет компенсироваться водой, поступающей в нее из водовода через водомерный патрубок.

Протекая через водомер, вода вращает вертушку, меняя при этом сопротивление цепи электромеханического счетчика оборотов вертушки, расположенного на пульте управления. По показаниям счетчика оборотов за фиксированный промежуток времени его работы определяют скорость вращения вертушки, а по ней (по тарировочной кривой) — расход воды, фильтрующийся из водовода на участке длиной L, равной длине устройства между фланцами.

Перед перестановкой устройства в новое положение производят разуплотнение герметизирующих камер путем включения мотор-насоса на откачку воды из камер.

В определенных условиях устройство можно выполнить с изменяющейся длиной, для чего центральную и периметральные трубы необходимо изготовить телескопическими.

Измеритель описанной конструкции можно применять в тунелях, не имеющих по длине местных сопротивлений (например,

напорный водосбросной туннель II яруса Чарвакской ГЭС, соединительные туннели, туннели на каналах и т. д.). Это устройство также можно применять в период строительства или при опорожнении туннелей.

Для получения более точных результатов опыта можно применить устройство, показанное на рис. 18.

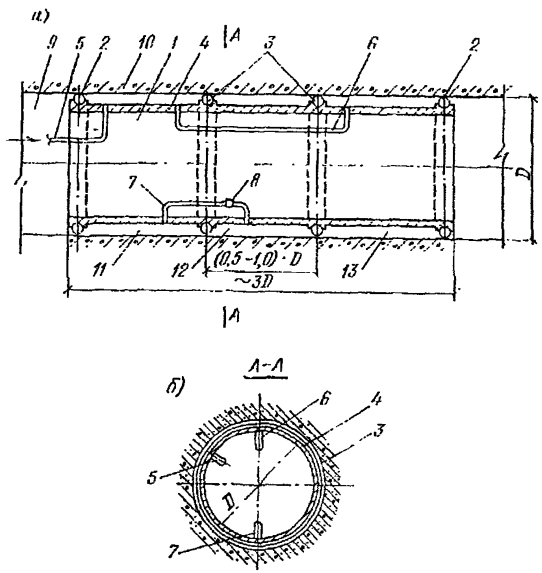


Рис. 18. Устройство для измерения утечек воды из подземного водовода

а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез; *1* — корпус; *2* — краевые уплотнения; *3* — средние уплотнения; *4* — стенка корпуса; *5, 6* — нагнетательные трубы; *7* — перепускная труба; *8* — водомер; *9* — туннель; *10* — порода; *11, 12, 13* — полости между устройством и породой.

Устройство включает корпус *1*, периметральные уплотнители *2* и *3*, нагнетательные *5* и *6* перепускную трубу *7* с водомером *8*.

Корпус *1* выполнен пустотелым, например, из стальной трубы длиной, равной трем диаметрам уплотнителей. На корпусе закреплены четыре периметральных регулируемых уплотнителя *2* и *3*, например, из резиновых камер, два из которых уплотнители *2* расположены по краям трубы, а уплотнители *3* — в средней ее части. Расстояние между средними уплотнителями равно 0,5 — 1,0 их диаметра.

С внутренней стороны корпуса в его стенку *4* врезаны нагнетательная труба *5*, по которой подается вода при проведении ис-

пытаний; труба *6*, соединяющая участки корпуса *1*, ограниченные внешними *2* и внутренними *3* уплотнителями; труба *7*, соединяющая участки корпуса, ограниченные крайним и средним и двумя средними уплотнителями.

Работает устройство следующим образом. В подготовленный для испытаний туннель *9* доставляют устройство, например, на раме на пневмоходу (на чертеже не показано) и устанавливают в рабочее положение в начале испытываемого участка. Прижимают уплотнители *2* и *3* к обделке туннеля *10*. Подключают трубу *5* к насосу и заполняют водой кольцевые полости *11*, *12* и *13* между корпусом устройства *1* и обделкой *10*, поддерживая при этом заданное давление. В полость *13* вода поступает через трубу *6*, а в полость *12* через трубу *7*. Под действием напора вода начинает фильтроваться через обделку *10* туннеля в породу и в обход крайних уплотнителей *2* в туннель *9*. В связи с тем, что из крайних полостей *11* и *13* часть воды будет утекать обратно в туннель, чего не может быть при работе напорного сооружения в натуре, при обработке результатов опыта учитывают только ту часть общего расхода воды, которая фильтруется в породу из центральной полости *12*. При этом обеспечиваются условия опыта, соответствующие работе реального сооружения, так как перетока воды из центральной полости *12* в крайние полости *11* и *13* и обратно не будет из-за практически равного напора воды во всех полостях.

Устройство для интегрального измерения утечек воды из напорного водовода

Конструкция этого устройства (рис. 17, *б*) [76] включает перемычку, выполненную в виде диска, поплавок, направляющие кронштейны и водомер. Диск-перемычка имеет радиальные ребра жесткости и периметральное кольцевое уплотнение в виде полого замкнутого резинового шланга. В диск-перемычку врезаны патрубки, в которых размещены расходомеры.

С помощью этого устройства определяют величину фильтрационного расхода из водовода на участке между устройством и концевым затвором (при наличии фильтрации через затвор вводят соответствующую поправку). Такие операции повторяют на каждой стоянке устройства.

Когда расход через водомер достигает предельно допустимой для него величины (по условиям точности измерения расхода), включают второй, а затем последующие расходомеры.

Устройство может иметь несколько уплотнительных камер.

Описанное устройство можно применять: а) в туннелях, не имеющих сужения на входе и на участках затворных камер, например, для условий напорного участка водосбросного туннеля II яруса Чарвакской ГЭС; б) на участках туннелей между затворным узлом и уравнительной шахтой; в) в уравнительных шахтах и вертикальных и наклонных турбинных водоводах, примыкающих к шахтам.

Устройство с эластичной оболочкой

Для определения величины и мест утечек в подземных водоводах, имеющих по длине местные сопротивления (раздельные бычки, переходные участки, повороты), можно применять устройство, показанное на рис. 17, *в* [76].

Устройство включает центральную составную (из двух секций) ось-трубу, эластичную оболочку с уплотнительным элементом, реверсивный электронасос и расходомер. К внутренним торцам секций трубы прикреплен герметичный кожух, в котором расположен электронасос. Всасывающий патрубок насоса врезан в верховую секцию трубы, а нагнетательный патрубок соединен с отверстием в оболочке кожуха. Верховая и низовая секция трубы соединены между собой трубками. В низовой секции трубы вмонтирован расходомер вертушечного типа. К расходомеру подведен электрический кабель, соединенный с пультом управления. Перемещение устройства по туннелю производят аналогично вышеуказанным примерам. Благодаря малым размерам устройства в поперечном сечении оно свободно проходит местные сужения в сооружении.

После установки устройства в месте измерения включают электронасос и заполняют оболочку водой, прижимая при этом уплотнительную полосу к обделке водовода. Включают расходомер и определяют фильтрационный расход. Затем переставляют устройство в новое положение и повторяют операции по его уплотнению и измерению расходов.

Помимо сигарообразной формы, устройство можно изготовить в виде шара (в рабочем положении) (рис. 17, *г*).

Исследование трещин с помощью полостей в обделке

При фильтрации воды через трещины и строительные швы бетонных сооружений фильтрационный расход со временем претерпевает изменения. Причинами уменьшения расхода является механический и химический кольматаж трещин, набухание бетона, изменение температуры. Увеличение расхода может быть вызвано усадочным и температурным раскрытием трещин или выщелачиванием цемента. Поэтому представляет большой практический интерес исследование изменения величины раскрытия трещин во времени в натурных подземных сооружениях.

Для правильной оценки проектных решений по назначению конструкции обделки большое значение имеет установление момента образования в ней трещин, а затем оценка поведения последних во времени.

Для обнаружения трещин в массиве бетонных сооружений наиболее часто используются способы буровых скважин, ультразвуковой дефектоскопии и закладной аппаратуры. Однако первые два не могут быть применены в напорных водоводах с указанной целью. Ответ на поставленные вопросы можно получить

лишь путем закладки в бетон специальных приборов, по которым в дальнейшем берутся регулярные отсчеты. Этот способ может дать наиболее достоверные сведения о возможном внутреннем трещинообразовании. Однако в настоящее время не имеется приборов, специально предназначенных для обнаружения и измерения раскрытия трещин внутри бетонного массива.

Принципиально для обнаружения трещин в бетоне могут быть использованы обычные телетензометры, установленные в виде цепочки (с некоторым перекрытием друг друга) в направлении, перпендикулярном плоскостям наиболее вероятного трещинообразования. Трещина, возникшая в пределах базы тензометра или вблизи ее, вызовет резкое изменение деформаций, фиксируемых тензометром. Но при больших размерах (десятки метров) исследуемого контура (периметра сечения) бетонной обделки понадобится большое количество сравнительно дорогостоящих телетензометров, база которых не превышает, как правило, 20 — 30 см, и соединительного кабеля. Поэтому применимость такой методики ограничивается экономическими соображениями.

Кроме того, обычные тензометры имеют сравнительно небольшой диапазон измерения — порядка 0,3 — 0,4 мм, что может оказаться недостаточным для измерения возможного раскрытия трещины. По этой же причине мало применимо значительное увеличение базы тензометра за счет присоединения к нему жесткого стержня, так как температурные деформации последнего могут исчерпать измерительные возможности тензометра при температурных перепадах. И, наконец, телетензометры не долговечны.

На рис. 19, *а* показано устройство, включающее приемную полость кругового сечения *1*, выполненную в обделке туннеля *2*,

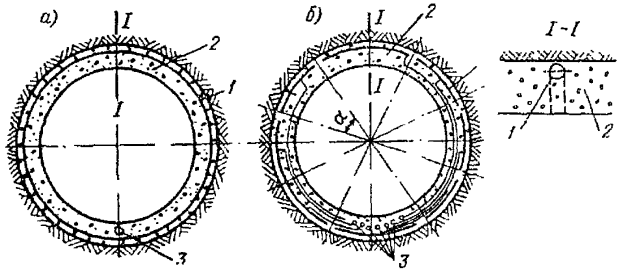


Рис. 19. Устройство для наблюдения за трещинообразованием в бетонных сооружениях и способ его выполнения

а — круговой канал; *б* — канал из нескольких дуг окружности; *1* — полость; *2* — бетон; *3* — труба для вывода воды из полости.

отводные трубы *3*, соединенные с полостью и измерительным пультом.

Приемную полость *1* выполняют при бетонировании обделки путем закладки эластичного полостеобразователя, например, резинового шланга диаметром 30 — 50 мм, заполненного под давлением водой или воздухом. После бетонирования обделки и схватывания бетонной смеси полостеобразователь освобождают от воды или сжатого воздуха. Для облегчения извлечения полостеобразователя его можно устроить из четырех кусков (рис. 19, *б*) каждый длиною в четверть окружности, соединенных короткими патрубками. После извлечения полостеобразователей в канал вставляют отводную трубу, другой конец которой выводят на наблюдательный пункт.

При возникновении в обделке трещины вода из туннеля попадает в приемную полость и из нее по трубке к измерительному пульту. На пульте при помощи приборов определяют момент образования трещин по расходу воды, фильтрующейся через нее, и напору. Кроме того, отбирают пробы для изучения химического состава воды и механических примесей.

На рис. 20 показана другая конструкция измерительного приспособления, включающая трещину *1*, выполненную в бетонной обделке *2*, водоприемную трубку *3* (рис. 20, *а*), водоотводную трубку *4* с вентилем *5*, манометром *6* и водомером *7* (рис. 20, *б*). Водоприемную трубку закладывают в проектное положение в обделке при ее бетонировании. Водоотводную трубку прокладывают в обделке и выводят через бетонную пробку *8* в подходной выработке *9*.

Для образования трещины-щели в нужном месте и требуемого размера перед бетонированием обделки напротив щели в водоприемной трубке прикрепляют пластинку толщиной, равной толщине трещины, из материала, растворимого в цементном молоке.

Щель можно выполнить также с помощью эластичной прокладки, извлекаемой из обделки после схватывания бетонной смеси.

В некоторых случаях может оказаться более целесообразным изготовление сборного бетонного блока с водоприемной трубкой и заранее фиксированной трещиной заданного раскрытия и закладка этого блока на место при бетонировании обделки (рис. 20, *г*).

Трещину в обделке можно устраивать как с внутренней стороны (рис. 20, *а*), так и с внешней (рис. 20, *в*) для измерения фильтрации подземной воды.

Если водоприемную трубку расположить в строительном шве, то специальную щель можно не устраивать.

При занапоривании туннеля вода по трещине поступает в водоприемную трубку, а затем через водоотводную трубку и вентиль — в мерный бачок (на рисунке условно не показано). С помощью вентиля и манометра устанавливают необходимый напор в системе и периодически наблюдают за фильтрационным

расходом. Одновременно фиксируют напор воды в туннеле. Во время наблюдений отбирают пробы воды для химического анализа.

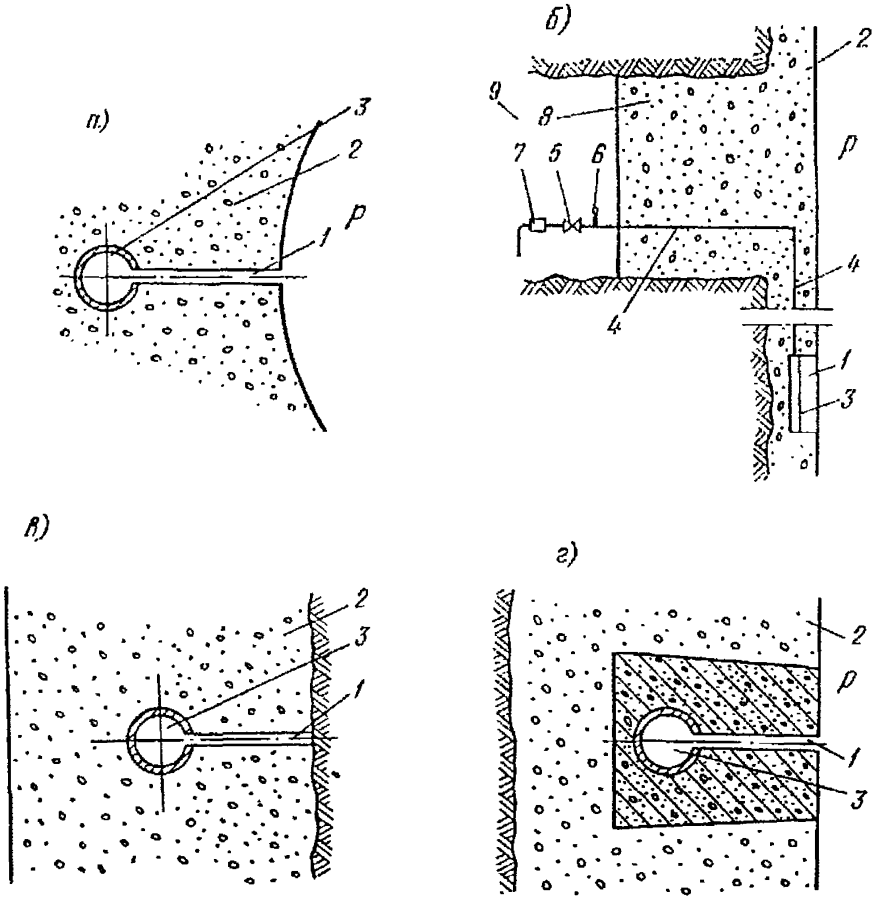


Рис. 20. Устройство для наблюдения за пропицаемостью трещин в обделках подземных сооружений и способ его выполнения

а — поперечный вертикальный разрез, щель выходит на внутреннюю поверхность обделки туннеля; *б* — горизонтальный разрез; *в* — горизонтальный разрез по плоскости, проходящий через ось туннеля, щель выходит на поверхность контакта обделки с породой; *г* — то же, что и в случае *в*, но щель устроена в закладном блоке бетона и выходит на внутреннюю поверхность обделки туннеля; *1* — щель, созданная искусственно; *2* — обделка бетонная; *3* — отрезок трубы с продольной прорезью против щели; *4* — труба, выводящая воду; *5* — вентиль; *6* — манометр; *7* — расходомер; *8* — пробка бетонная; *9* — подходная выработка (например, строительный штрек); *p* — давление воды в туннеле.

По изменению расхода воды судят о явлениях, происходящих в трещине (кольматаж, эрозия и т. п.). Кроме этого, можно учитывать такие факторы, как изменение давления, температуры и т. д.

Испытание водопроницаемости межблочных швов обделок

При возведении обделок тунней и шахт устраивают технологические швы, разрезающие массив на отдельные блоки. Эти

швы являются слабыми местами сооружений. Однако после возведения сооружение должно быть монолитным и минимально водопроницаемым. Поэтому для уменьшения водопроницаемости швов производят обработку их поверхности, штрабление или устраивают шпонки. Но несмотря на эти мероприятия в построенных водоподпорных сооружениях имеет место фильтрация воды через строительные швы.

Для практических целей важно знать водопроницаемость швов натурных бетонных сооружений.

Для этого можно применить устройство, показанное на рис. 21, *а*. Конструкция состоит из фильтров *1* длиной 5 м, стальных оцинкованных труб *2* диаметром 1 — 2 дюйма, на которых установлены манометры *3* и вентили *4*. Трубы расположены с уклоном в сторону фильтров. Манометры и вентили расположены в шкафу *5*, предохраняющем их от повреждений. Одна из труб подключена к мерному сосуду *6*, а другая *7* — к напор-

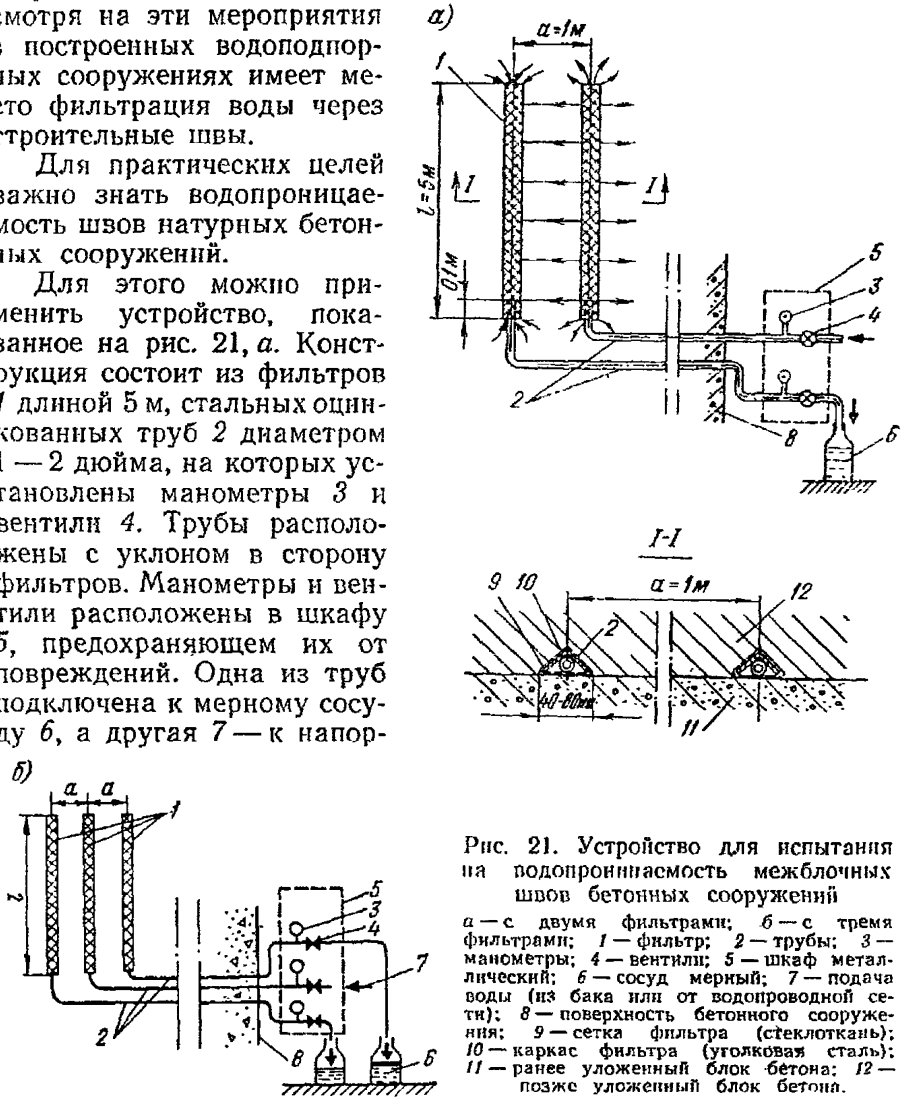


Рис. 21. Устройство для испытания на водопроницаемость межблочных швов бетонных сооружений

а — с двумя фильтрами; *б* — с тремя фильтрами; *1* — фильтр; *2* — трубы; *3* — манометры; *4* — вентили; *5* — шкаф металлический; *6* — сосуд мерный; *7* — подача воды (из бака или от водопроводной сети); *8* — поверхность бетонного сооружения; *9* — сетка фильтра (стеклоткань); *10* — каркас фильтра (уголковая сталь); *11* — ранее уложенный блок бетона; *12* — позже уложенный блок бетона.

ному резервуару или насосу (на рис. 21 не показано) Трубы *2* выведены за пределы блока *8*.

В поперечном разрезе фильтры состоят из уголкового каркаса *10*, выполненного из коррозийно-стойкого материала и обернутого двумя слоями стеклоткани *9*. Фильтры могут иметь

также и другие формы. Внутрь фильтров на длину 10 — 15 см введены трубы *2*. Фильтры располагают в шве между нижним *11* и верхним *12* блоками.

Вместо фильтров можно устроить полости с помощью извлекаемого резинового шланга.

Торцы фильтров *1* герметизированы во избежание проникновения цементного раствора внутрь элементов. Испытание шва на водопроницаемость с помощью данного устройства производят следующим образом: заполняют водой трубы *2* и фильтры *1*. Воду подают с небольшими расходами, чтобы не препятствовать вытеснению воздуха из фильтров.

После заполнения системы водой закрывают нижний вентиль *4* и при открытом верхнем вентиле нагнетают воду в правый фильтр *1*, поддерживая постоянное давление (например, равным 1000 см вод. ст.). После того, как показание нижнего манометра совпадет с показанием верхнего, (что произойдет к моменту, когда вода из правого фильтра просочится по межблочному шву до левого фильтра), открывают нижний вентиль и с помощью хронометра и мерного сосуда *6* определяют расход воды Q (см³/с), просочившейся при постоянном напоре H (см вод. ст.) через межблочный шов шириною a (см) и длиною l (см).

Затем вычисляют коэффициент водопроницаемости шва (см²/с) по формуле:

$$k = \frac{Q}{lJ},$$

где градиент напора

$$J = \frac{H}{a}.$$

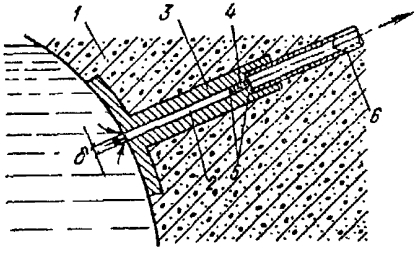


Рис. 22. Схема прибора для исследования кольматажа трещин в обделках работающих туннелей

1 — обделка туннеля; *2* — щель плоская с раскрытием δ; *3* — металлическая коробка; *4* — обратный фильтр (песок); *5* — сетки; *6* — трубка для вывода воды к месту измерений расхода.

В этих выражениях не принимается во внимание гидравлическая связь между потоком в шве и фильтрационным потоком в теле бетона; неучет этой связи практически допустим в случае гидротехнических бетонов, характеризуемых марками по водопроницаемости В2 — В12.

Замеры производят через определенные промежутки времени, имея в виду, что водопроницаемость шва со временем уменьшается за счет набухания бетона и других физико-химических процессов.

Можно применить также схему с тремя фильтрами (рис. 21, *б*) для случаев, когда при прочих одинаковых условиях сравнива-

ется проницаемость шва, находящегося между фильтрами левым и средним, с проницаемостью шва, находящегося между фильтрами средним и правым. Очевидно, что отношение коэффициентов водопроницаемости этих швов равно отношению расходов, поступающих в левый и правый сосуды. Это позволит судить, во сколько раз отличается проницаемость швов, обработанных разными способами, и способствует выбору оптимального из них.

Для исследования кольматажа трещин в обделках работающих туннелей можно применить устройство, показанное на рис. 22.

Приложение 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УТЕЧЕК ВОДЫ ПРИ НАЛИЧИИ ВОКРУГ ТУННЕЛЕЙ ЗАЦЕМЕНТИРОВАННОЙ ПОРОДЫ

В настоящее время одним из рациональных типов обделок, работающих с использованием несущих свойств горного массива, считается обделка с цементацией окружающей туннель породы. Такой тип обделки применяют в достаточно прочных и устойчивых породах, способных воспринимать полный напор воды в туннеле. В этих условиях главным назначением глубокой цементации является уменьшение утечек воды из туннеля.

Противофильтрационная цементация является важным конструктивным элементом обделки, и поэтому важно знать и правильно использовать способы контроля ее качества как в процессе производства работ, так и в период эксплуатации.

Контроль качества цементации в процессе ее выполнения

Основным методом контроля качества противофильтрационной цементации является нагнетание воды в скважины, пробуренные в зоне цементации. При этом количество (n) контрольных скважин в поперечнике предлагается определять по формуле [62]:

$$n = 0{,}5\pi D/b, \qquad (1)$$

где D — диаметр выработки, м; b — радиус активной зоны скважины, м (рис. 1).

Величину b определяют подбором (или с помощью ЭВМ при ее наличии) из уравнения [59]:

$$\lg\left(\frac{l}{b} + \sqrt{\frac{l^2}{b^2}+1}\right) = 0{,}2\lg\frac{1{,}32l}{r_c}$$

$$\text{при } \frac{l}{r_c} \geqslant 20. \qquad (2)$$

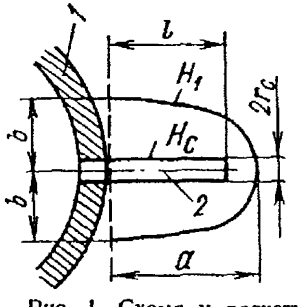


Рис. 1. Схема к расчету радиуса активной зоны скважины

1 — обделка туннеля; *2* — скважина.

Здесь l — глубина цементируемой скважины; r_c — ее радиус.

Пример. Задано $l = 5$ м; $r_c = 0{,}025$ м. Требуется определить b. Находим $0{,}2\lg(1{,}32l/r_c) = 0{,}2\lg(1{,}32\times5{,}0/0{,}025) = 0{,}484$. Из (2) имеем $\lg(l/b + \sqrt{l^2/b^2+1}) = 0{,}484$, откуда $l/b = 1{,}36$ и $b = l/1{,}36 = 5/1{,}36 = 3{,}7$ м.

Для определения фактических размеров зоны противофильтрационной цементации, выполняемой вокруг высоконапорного туннеля, имеющего обделку с допустимым раскрытием трещин, в характерных створах туннеля целесообразно закладывать точечные пьезометры, которые позволяют определять проницаемость и долговечность зоны цементации. Пьезометры следует располагать по четыре штуки вдоль каждого выбранного луча (см. рис. 13) так, чтобы середина фильтра каждого пьезометра располагалась: на контакте породы с обделкой, посредине проектной толщины (c) зоны цементации, на внешней границе проектной зоны цементации и за пределами зацементированной породы на расстоянии $0{,}5c$ [59].

Для выполнения пьезометров пробуривают из туннеля скважины диаметром $d=50$ мм, которые на участках вне фильтров тампонируют; из фильтров воду выводят на измерительный щит по стальным оцинкованным трубам диаметром около 25 мм. На щите трубы оснащают вентилями и пружинными манометрами (рис. 14).

При породе, изотропной по водопроницаемости, а также слоистой, когда слои расположены нормально к оси туннеля, целесообразно применять, как минимум, двухлучевую схему расположения пьезометров (рис. 16, $а$); однако предпочтительнее трехлучевая схема (рис. 16, $б$). При анизотропной по проницаемости породе целесообразно оси пьезометров направлять под углом 45° к осям анизотропии и желательно принимать четырехлучевую схему.

Фильтры точечных пьезометров можно располагать не на одной прямой, а на расстоянии (по окружности) до 1 — 2 м друг от друга, чтобы было удобней размещать выводные трубы. Пространство между трубами и стенками скважин должно быть тщательно затампонировано, чтобы изолировать пьезометр и обеспечить ему возможность измерения давления воды в данной точке. Длину фильтра следует принимать от 0,4—0,6 м (при мелкоблочной трещиноватости породы) до 0,8 — 1,2 м (при крупноблочной трещиноватости и значительной толщине c зоны цементации). В створе точечных пьезометров или вблизи от него следует предусмотреть вертикальную пьезометрическую скважину с фильтром длиной $3l$, расположенную над сводом туннеля на высоте не менее $(7-10)c$, но обязательно под зеркалом подземных вод. Труба от этого пьезометра выводится также на измерительный щит.

Кроме того, для измерения давления воды внутри туннеля в измерительном створе закладывается трубка с водоприемным отверстием, расположенным заподлицо с внутренней поверхностью обделки в верхней части туннеля во избежание засорения трубки.

Наблюдения, выполняемые с помощью вышеописанных устройств, позволят судить о долговечности противофильтрационной цементации, величине потерь воды на фильтрацию, а также позволят принимать в дальнейшем еще более экономичные проектные решения по выравнивающим обделкам с противофильтрационной цементацией породы. Поэтому точечными пьезометрами рекомендуется оборудовать и опытные камеры гидравлического опробования, устраиваемые с целью определения деформативных и фильтрационных характеристик обделки и породы. Измерительные пьезометрические створы в камерах желательно располагать на расстоянии одной трети длины камеры от ее торцов.

С помощью точечных пьезометров можно определить: а) напоры подземной воды в зоне цементации и породе (рис. 17); б) давление грунтовой воды на обделку и на кольцо зацементированной породы; в) фактическую границу зоны цементации; г) соотношение водопроницаемостей зоны цементации и бетонной обделки.

Пьезометры позволяют определить еще и величину коэффициента фильтрации k породы в близкой окрестности вокруг фильтров. Для этого: а) замеряют по манометру напор h в пьезометре; б) открывают верхние вентили (рис. 14) и выпускают воду из пьезометров; в) замеряют установившийся расход воды $Q_п$, вытекающей из пьезометра в мерный бачок по трубе с напором $h_{вых}$ на ее выходном конце. Величину k подсчитывают по формуле:

$$k = \frac{Q_п}{2\pi l\,(h - h_{вых})} \ln \frac{al}{r_c}, \qquad (3)$$

где a — коэффициент, равный 1,32 при фильтре, примыкающем к обделке, и 0,66 — при фильтре, не примыкающем к обделке.

Для первого случая (полупространство, рис. 2, *а*) формула, например по [49], имеет вид:

$$Q_п = 2\pi kl\,(h - h_{вых}) \Big/ \ln \frac{1{,}32l}{r_c}. \qquad (4)$$

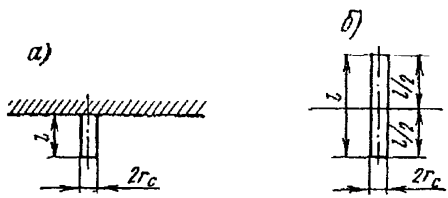


Рис. 2. Схема скважины
а — в полупространстве; *б* — в неограниченном пространстве.

Чтобы получить формулу для неограниченного пространства (рис. 2, *б*), следует в правую часть равенства (4) подставить

вместо l величину $0{,}5l$ и удвоить правую часть, исходя из того, что переход от схемы полупространства к неограниченному пространству равносилен зеркальному отражению скважины, а следовательно, и удвоению расхода. Тогда получим:

$$Q_{\text{п}} = \frac{2\pi kl\,(h - h_{\text{вых}})}{\ln \dfrac{0{,}66l}{r_{\text{с}}}}. \qquad (5)$$

Можно вместо выпуска воды из пьезометра производить нагнетание под напором H; тогда в формулу (3) вместо $h - h_{\text{вых}}$ следует подставить $H - h$. По полученным значениям коэффициентов фильтрации можно построить их эпюры вдоль измерительных лучей и оценить фактическую границу зоны цементации. Используя эпюры напоров и коэффициентов фильтрации, с помощью известной формулы Дюпюи для радиальной осесимметричной фильтрации можно подсчитать удельную величину утечки воды из туннеля (на один метр его длины) Q_1.

Предварительно, пользуясь рис. 17, определим коэффициент фильтрации бетонной обделки туннеля:

$$k_{\text{об}} = \frac{Q_1}{2\pi (h - h_0)} \ln \frac{R}{R_0}, \qquad (6)$$

позволяющий оценить относительную роль обделки в качестве фильтрационного сопротивления.

Удельную величину утечек воды из туннеля при наличии цементации породы и при пренебрежении сопротивлением бетонной обделки при наличии в ней трещин можно определить по формуле [59]:

$$Q_1 = \frac{2\pi (k_1R_2 - k_2R_1)(h_1 - h_2)}{(R_2 - R_1) \ln \dfrac{k_1R_2}{k_2R_1}}, \qquad (7)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты фильтрации в зоне цементации, подсчитанные по этом принимается, что внутри цилиндрической области коэффициент фильтраэтом-принимается, что внутри цилиндрической области коэффициент фильтрации с увеличением радиуса x от R_1 до R_2 изменяется по линейному закону от k_1 до k_2); h_1 и h_2 — напоры на цилиндрических поверхностях с радиусами R_1 и R_2.

Расчет производят для трех комбинаций пьезометров, расположенных от оси туннеля на расстояниях: 1) $x = R$ и $x = R + 0{,}5c$; 2) $x = R + 0{,}5c$ и $x = R + c$ и 3) $x = R + c$ и $x = R + 1{,}5c$. Из условия неразрывности фильтрационного потока, все три величины Q_1 должны совпадать между собой или отличаться в пределах, допустимых для каждого конкретного случая.

При слабопроницаемых средах (бетон, зацементированная порода) вместо простейших однотрубных пьезометров, требующих значительного времени для достижения установившегося показания, целесообразно пользоваться струнными пьезодинамометрами. Однако они имеют значительную стоимость и требу-

ют квалифицированных наблюдателей. Более дешевыми являются малоинерционные двухтрубные пьезометры системы Бюро мелиорации США [48].

Если вокруг опытной камеры (штрека) отсутствуют естественные подземные воды с достаточно большим напором, следует воспользоваться предложением, имеющимся в [86], в соответствии с которым вокруг опытной камеры, включая и ее торцы, создают на удалении нескольких метров от поверхности контакта обделки камеры с породой уплотненную цементацией зону. Затем под заданным напором воду нагнетают в незацементированную породу (целик), находящуюся между обделкой и зацементированной породой. Воду нагнетают через скважины (шпуры), пробуренные через обделку целика.

Приложение 7

ПРИМЕРЫ ЭПЮР ОСТАТОЧНЫХ НАПОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ОБДЕЛКИ ТУННЕЛЕЙ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Эпюры остаточных напоров

На рис. 1 — 6 показаны эпюры остаточных напоров, полученные методом ЭГДА на объемных моделях в ГрузНИИЭГСе для отводящего туннеля Озерной (Севанской) ГЭС (рис. 1 — 3), подводящего туннеля Шамбской ГЭС (рис. 4) и строительных туннелей Нурекской ГЭС (рис. 5 и 6). На этих рисунках обозначено: l — длина шпуровых дрен, $2r_c$ — их диаметр, L — расстояние (шаг) между поперечниками со шпурами вдоль туннеля, t — расстояние от оси туннеля до горизонтальной поверхности подземных вод (или до дна водохранилища, если туннель находится под ним); φ — остаточный напор подземных вод на наружной поверхности обделки туннеля (принимаемой водонепроницаемой), в процентах от H, где H — напор подземных вод над осью туннеля в случае отсутствия дренажа, равный величине t при расположении туннеля под горизонтальной поверхностью подземных вод, или величине H_0 при расположении туннеля под дном водохранилища, где H_0 — расстояние от уровня воды в водохранилище до оси туннеля.

Расчетные формулы

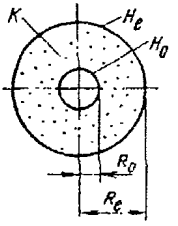
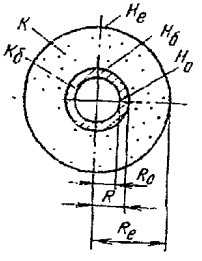
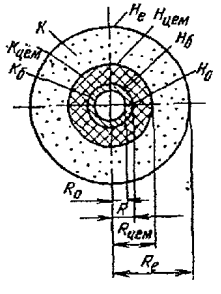
В таблице приведены для наиболее распространенных случаев расчетные схемы и формулы, взятые из [55]. Если депрессионная поверхность подземных вод не является горизонтальной плоскостью, а имеет прогиб с низшей точкой, расположенной на вертикали, проходящей через ось туннеля, то за величину t следует принять расстояние от упомянутой низшей точки до оси туннеля и величину R_e определять по выражению:

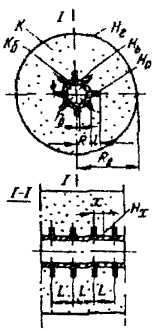
$$R_e = 0{,}5t,$$

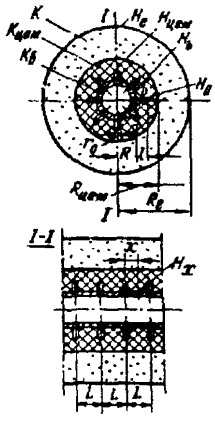
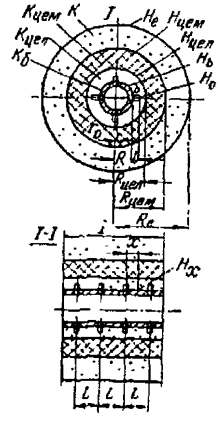
при условии, что

$$t \gg R_* = R + l,$$

Сводка расчетных схем и формул

Расчетная схема	Расчетная формула	Условия применения
	*Протяженные сооружения* 1. Дрены отсутствуют $q = \frac{2\pi k H}{\ln \frac{R_e}{R_0}}$ (1)	Цементация и обделка отсутствуют
	$q = \frac{2\pi H}{\frac{1}{k_б}\ln\frac{R}{R_0} + \frac{1}{k}\ln\frac{R_e}{R}}$ (2) $\varphi_б = \frac{H_б - H_0}{H} = \frac{1}{1 + \frac{k_б}{k}\frac{\ln\frac{R_e}{R}}{\ln\frac{R}{R_0}}}$ (3)	Цементация отсутствует
	$q = \frac{2\pi H}{\frac{1}{k_б}\ln\frac{R}{R_0} + \frac{1}{k_{цем}}\ln\frac{R_{цем}}{R} + \frac{1}{k}\ln\frac{R_e}{R_{цем}}}$ (4) $\varphi_б = \frac{H_б - H_0}{H} = \frac{\frac{1}{k_б}\ln\frac{R}{R_0}}{\frac{1}{k_б}\ln\frac{R}{R_0} + \frac{1}{k_{цем}}\ln\frac{R_{цем}}{R} + \frac{1}{k}\ln\frac{R_e}{R_{цем}}}$ (5) $\varphi_{цем} = \frac{H_{цем} - H_0}{H} = \frac{\frac{1}{k_б}\ln\frac{R}{R_0} + \frac{1}{k_{цем}}\ln\frac{R_{цем}}{R}}{\frac{1}{k_б}\ln\frac{R}{R_0} + \frac{1}{k_{цем}}\ln\frac{R_{цем}}{R} + \frac{1}{k}\ln\frac{R_e}{R_{цем}}}$ (6)	Цементация имеется

Расчетная схема	Расчетная формула	Условия применения
	2. Шпуровые дрены	
	$q = \dfrac{2\pi kH}{\dfrac{AL}{2nl} + \ln\dfrac{R_e}{R+a}}$ (7)	Цементация отсутствует $n \geqslant 3$, $m \geqslant 5$, $l/r_c \geqslant 4$, $l/R \leqslant 1$, $x \leqslant b$, $k_б = 0$
	$\varphi_b = \dfrac{H_b - H_0}{H} = \dfrac{1}{1 + \dfrac{2nl}{AL}\ln\dfrac{R_e}{R+a}}$ (8)	
	$\varphi_x = \dfrac{H_x - H_0}{H} = \varphi_b \dfrac{A_x}{A}$ (9)	
	$A = \operatorname{Arsh}(0{,}25l/r_c) + \operatorname{Arsh}(1{,}75l/r_c) - 2\operatorname{Arsh}(l/b)$ (10)	
	$A_x = \operatorname{Arsh}(0{,}25l/r_c) + \operatorname{Arsh}(1{,}75l/r_c) - 2\operatorname{Arsh}(l/x)$ (11)	
	$a = \sqrt{b^2 + l^2}$ (12)	
	При расположении шпуров на развертке внешней поверхности обделки туннеля (шахты) по сетке, образованной: прямоугольниками с соблюдением условия $0{,}25 \leqslant \dfrac{\pi R}{nL} \leqslant 1$; $b = R\sin\left[0{,}5\left(\dfrac{\pi}{n} + \dfrac{0{,}5L}{R}\right)\right]$ (13)	
	квадратами $L = \dfrac{2\pi R}{n}$; $b = R\sin\dfrac{n}{\pi}$ (14)	
	равносторонними треугольниками $L = \dfrac{\sqrt{3}\pi R}{n}$; $b = R\sin\dfrac{\pi}{n}$ (15)	

Расчетная схема	Расчетная формула	Условия применения
	$$q = \frac{2\pi k_{цем} H}{\frac{AL}{2nl} + \ln\frac{R_{цем}}{R + a\sqrt{k_{цем}/k}} + \frac{k_{цем}}{k}\ln\frac{R_e}{R_{цем}}} \quad (16)$$ $$\varphi_b = \frac{H_b - H_0}{H} = \frac{1}{1 + \frac{2nl}{AL}\left(\ln\frac{R_{цем}}{R + a\sqrt{k_{цем}/k}} + \frac{k_{цем}}{k}\ln\frac{R_e}{R_{цем}}\right)} \quad (17)$$ $$\varphi_{цем} = \frac{H_{цем} - H_0}{H} = 1 - \frac{\frac{k_{цем}}{k}\ln\frac{R_e}{R_{цем}}}{\frac{AL}{2nl} + \ln\frac{R_{цем}}{R + a\sqrt{k_{цем}/k}} + \frac{k_{цем}}{k}\ln\frac{R_e}{R_{цем}}} \quad (18)$$ Величины φ_x, A, A_x, a, b, L определяют по формулам (9) — (15)	Цементация имеется, целик отсутствует $n \geqslant 3$, $m \geqslant 5$, $l/r_c \geqslant 4$, $l/R \leqslant 1$, $l/(R_{цем} - R) \leqslant 0{,}8$, $x \leqslant b$, $k_б = 0$
	$$q = \frac{2\pi k_{цел} H}{\frac{AL}{2nl} + \ln\frac{R_{цел}}{R + a\sqrt{k_{цел}/k}} + \frac{k_{цел}}{k_{цем}}\ln\frac{R_{цем}}{R_{цел}} + \frac{k_{цел}}{k}\ln\frac{R_e}{R_{цем}}} \quad (19)$$ $$\varphi_b = \frac{H_b - H_0}{H} = \frac{ALq}{4\pi nlk_{цел}H} \quad (20)$$ $$\varphi_{цел} = \frac{H_{цел} - H_0}{H} \approx \varphi_b \quad (21)$$ $$\varphi_{цем} = \frac{H_{цем} - H_0}{H} \approx \varphi_b + \frac{q}{2\pi k_{цем} H}\ln\frac{R_{цем}}{R_{цел}} \quad (22)$$ Величины φ_x, A, A_x, a, b, L определяют по формулам (9) — (15)	Цементация имеется при напорной фильтрации в целике $n \geqslant 3$, $m \geqslant 5$, $l/r_c \geqslant 4$, $l/R \leqslant 1$, $l/(R_{цел} - R) \leqslant 0{,}85$, $x \leqslant b$, $0 < k_{цел}/k \leqslant 1$, $0 < k_{цем}/k \leqslant 1$, $k_б = 0$

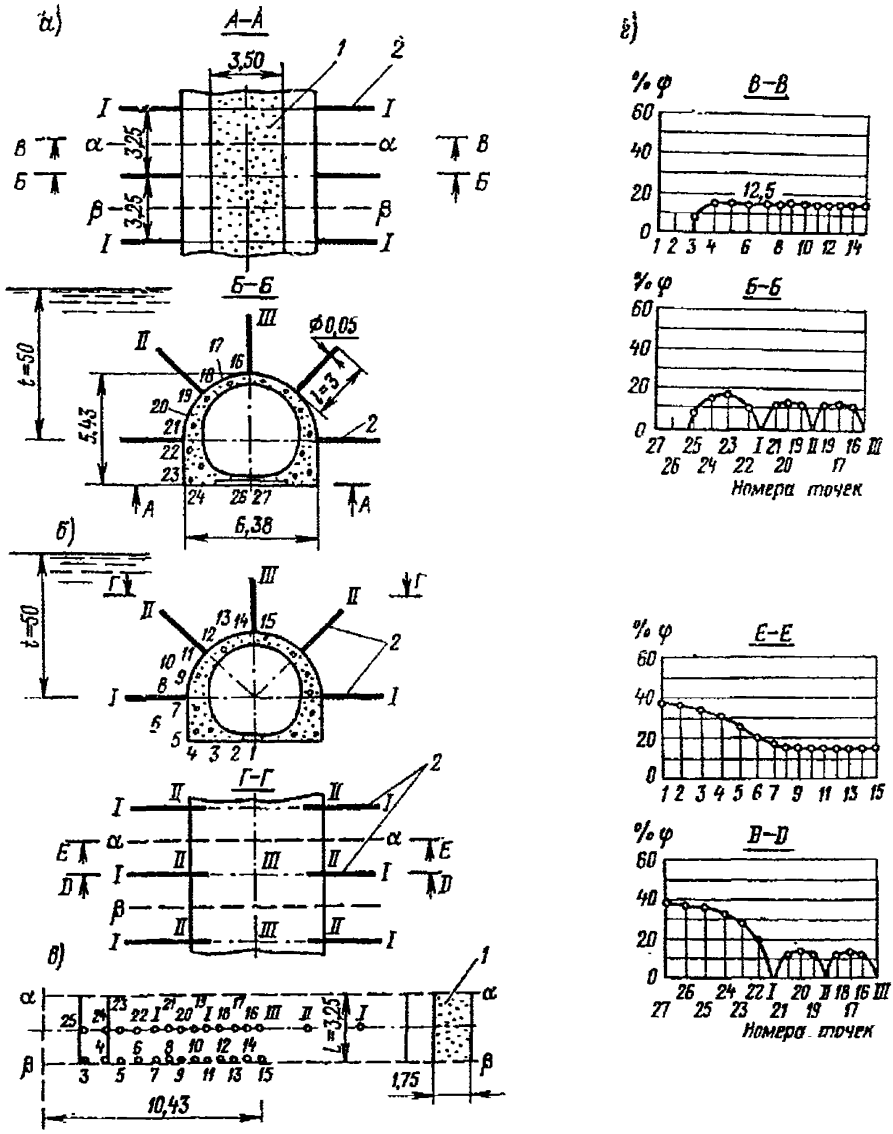


Рис. 1. Вариант дренажа отводящего туннеля Озерной ГЭС. Размеры, м

а — в лотке ленточный, в стенах и своде шпуровой дренаж l=3 м; *б* — шпуровой дренаж l=3 м в стенах и лотке; *в* — развертка по наружной поверхности обделки по схеме *а*; *г* — эпюры остаточных напоров; *1* — ленточный дренаж; *2* — шпуровые дрены.

где R — расчетный радиус обделки по контакту с породой; при наличии зоны цементации с расчетным радиусом $R_{цем}$ должно соблюдаться условие:

$$t \gg R_* = R_{цем};$$

при отсутствии шпурового дренажа и зоны цементации

$$t \gg R_* = R;$$

при отсутствии обделки

$$t \gg R_* = R_0,$$

где R_0 — радиус туннеля без обделки; q — расход воды, фильтрующейся в туннель, отнесенный к единице его длины; k — коэффициент фильтрации незацементированной породы; $k_б$ — коэффициент фильтрации обделки (напри-

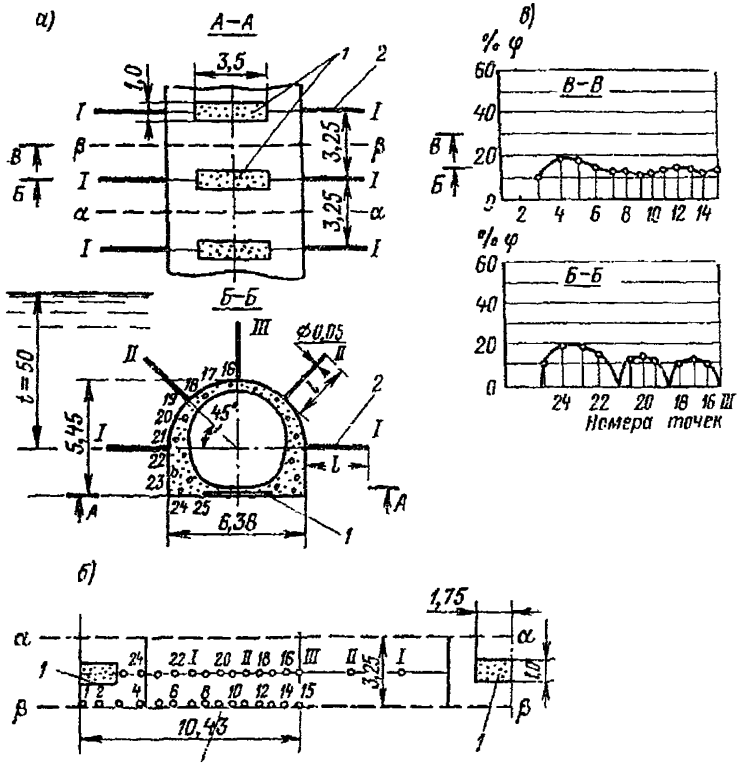


Рис. 2. Вариант дренажа отводящего туннеля Озерной ГЭС. Размеры, м

а — схема дренирования (в лотке дискретный ленточный, в стенах и своде шпуровой дренаж); *б* — развертка по наружной поверхности обделки; *в* — эпюры остаточных напоров; *1* — дискретные ленточные дрены; *2* — шпуровые дрены.

мер, из бетона или железобетона); $k_{цем}$ — коэффициент фильтрации зацементированной породы; H с индексами — напоры на соответствующих цилиндрических поверхностях; H_e — напор на расчетной поверхности, сквозь которую фильтрационный поток входит в породу; H_0 — напор на поверхности, сквозь которую фильтрационный поток выходит из породы в сооружение; этой поверхностью является поверхность выработки при отсутствии обделки и дрен, или внутренняя поверхность обделки при отсутствии дрен или совокупность поверхностей контакта дрен с породой. Напор H_0 на поверхности всех дрен (при их отсутствии — во всех точках внутренней поверхности обделки, а при отсутствии обделки — во всех точках поверхности выработки в породе) принят одинаковым; при отсутствии воды в туннеле за расчетную осредненную

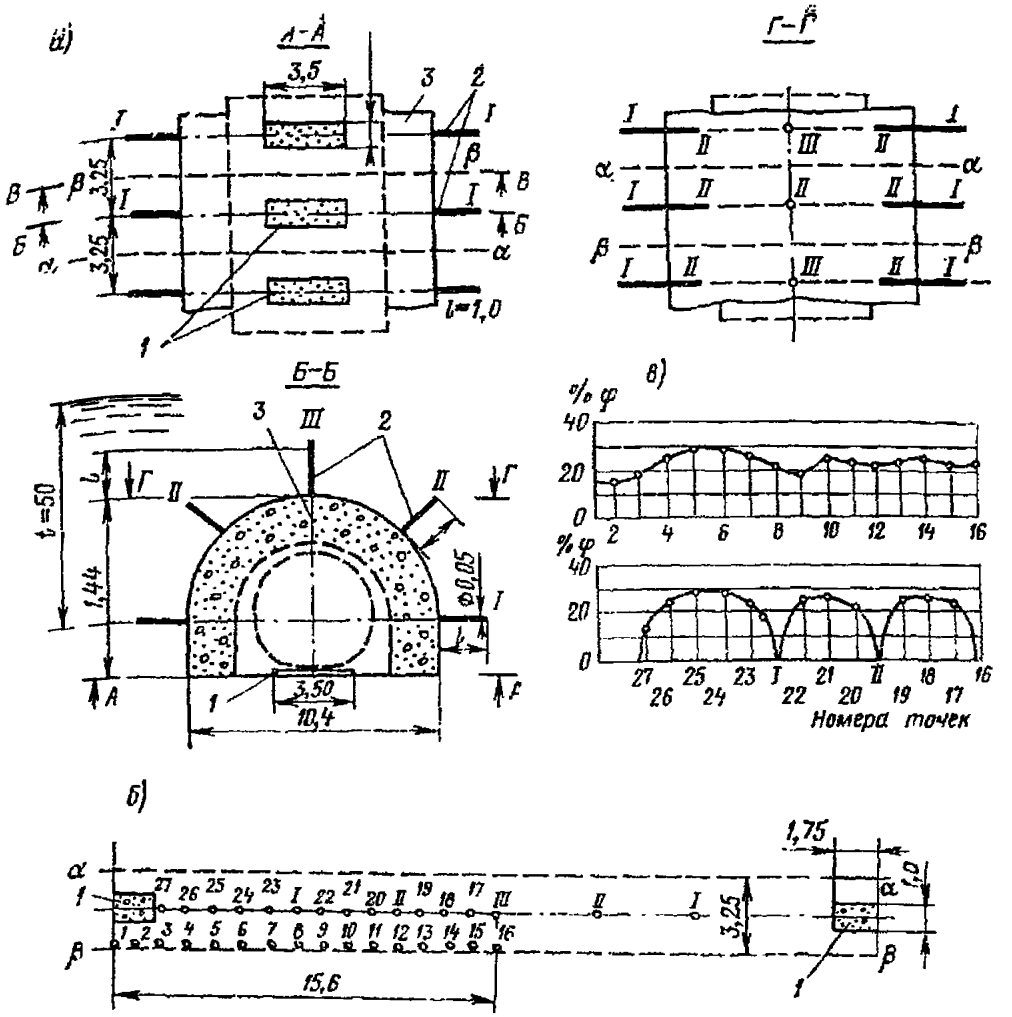


Рис. 3. Вариант дренажа отводящего туннеля Озерной ГЭС. Размеры, м

а — схема дренирования; *б* — развертка по наружной поверхности обделки; *в* — эпюры остаточных напоров; *1* — дискретные ленточные дрены; *2* — шпуровые дрены; *3* — противофильтрационная цементация.

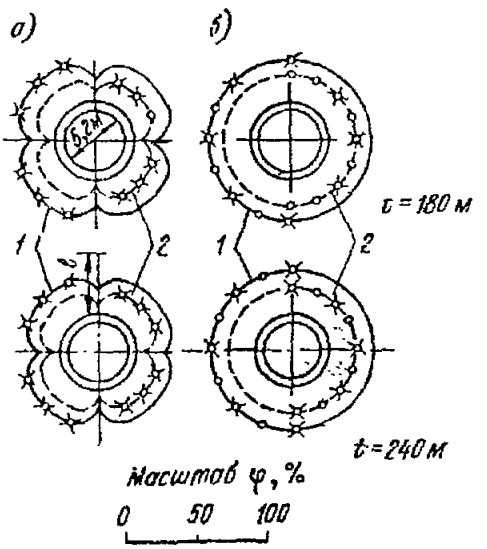


Рис. 4. Эпюры остаточных напоров (φ, %) на обделку подводящего туннеля Шамбской ГЭС при четырех шпуровых дренах

а — в сечениях с дренами; *б* — в сечениях между дренами; *1* — при $l = 2$ м; *2* — при $l = 4$ м.

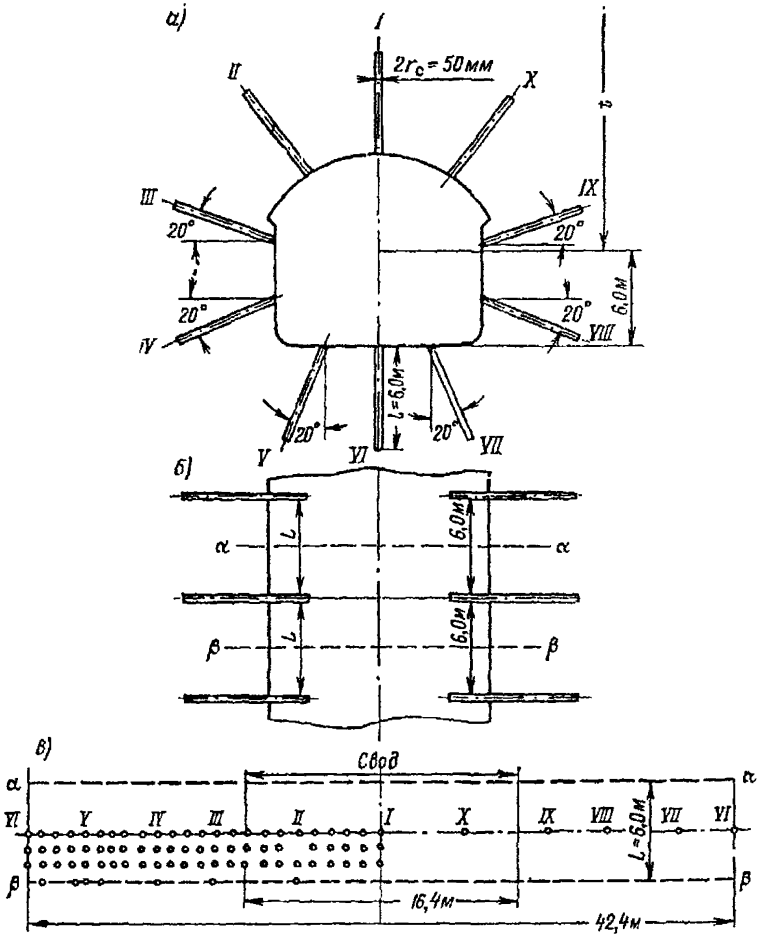


Рис. 5. Шпуровый дренаж строительного туннеля I яруса Нурекской ГЭС, исследованный методом ЭГДА при параметрах: $t = 44$ м, $L = 6$ м, число шпуров в каждом поперечнике $n = 10$, $l = 6$ м и $l = 3$ м, $2r = 50$ мм

а — поперечный разрез по туннелю; *б* — вид сверху; *в* — развертка по наружной поверхности.

величину H_0 следует брать расстояние от оси туннеля до плоскости отсчета напоров; $H = H_в - H_0$ — полный перепад напора (действующий напор), гасящегося во всей области фильтрации; $H_б$ — напор на поверхности контакта проницаемой обделки с породой или зацементированной породой; H_b — напор в точке *в* внешней поверхности непроницаемой обделки при дренах в виде шпуров; точка *b* находится на равных расстояниях от осей ближайших к ней четырех дрен; H_x — напор в точке *x*, расположенной на внешней поверхности обделки и отстоящей на расстоянии от оси ближайшей дрены; $H_{дом}$ — напор

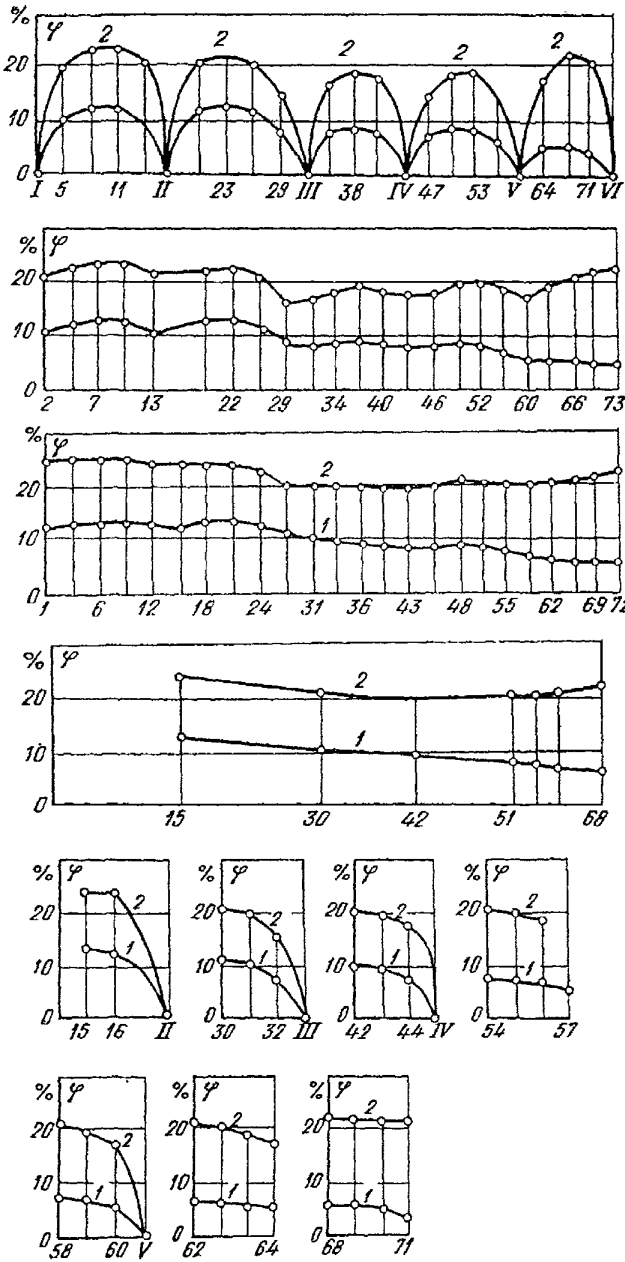


Рис. 6. Шпуровой дренаж строительного тоннеля 1 яруса Нурекской ГЭС. Эпюры остаточных фильтрационных напоров на внешней поверхности обделки в точках, показанных на рис. 5
1 — при *l*=6 м; *2* — при *l*=3 м.

на внешнем контуре расчетной зоны цементации; $\varphi_i = \frac{H_i - H_0}{H}$ — относительный (остаточный) напор (в долях полного перепада напора H), индекс i при φ указывает, в какой точке или на какой поверхности (с напором H_i) рассматривается данный относительный напор; $\varphi_б$ — относительный напор на внешней поверхности обделки; φ_b — относительный напор в точке b (о положении которой было сказано выше в связи с H_b); R_e — радиус расчетной цилиндрической поверхности, сквозь которую фильтрационный поток входит в породу; при действительной плоской поверхности входа потока в породу, от которой сооружение отстоит на расстоянии t, $R_e = 2t$ при условии $t \gg R_*$; $R_{цем}$ — радиус расчетной внешней цилиндрической поверхности зоны цементации; R — радиус внешней расчетной поверхности обделки; R_0 — радиус внутренней расчетной поверхности обделки; r_e — радиус шпуровой дрены; l — длина шпуровой дрены; L — расстояние (шаг) между осями соседних дрен в направлении оси туннеля; n — число дрен в поперечном сечении туннеля; дрены расположены равномерно; m — число поперечников с дренами в туннеле.

В схемах со шпуровыми дренами бетонная обделка принята непроницаемой ($k_б = 0$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Царев А. И., Еникеев Ф. Г.** О предельно допустимых показателях безопасной работы гидротехнических сооружений. — Гидротехническое строительство, 1981, № 9, с. 34 — 37.

2. **Чумбуридзе Г. К.** Изучение условий работы обделок гидротехнических туннелей, находящихся в эксплуатации. — Известия ТНИСГЭИ им. А. В. Винтера, 1967, т. 17, с. 393 — 404.

3. **Указания** по проектированию гидротехнических туннелей: СН 238-73. — М.: Стройиздат, 1974. — 40 с.

4. **Аравин В. И., Носова О. Н.** Натурные исследования фильтрации (теоретические основы). — Л.: Энергия, 1969. — 256 с.

5. **Носова О. Н.** Основы фильтрационного контроля гидротехнических сооружений. — Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора техн. наук. — Л., 1977. — 50 с./(ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).

6. **Руководство** по инженерно-геологическим изысканиям для строительства подземных гидротехнических сооружений: П-655-77/Гидропроект. — М., 1978. — 86 с.

7. **СНиП II-50-74:** Гидротехнические сооружения речные. Основные положения проектирования. — М.: Стройиздат, 1975. — 24 с.

8. **СНиП II-16-76.** Ч. I: Основания гидротехнических сооружений. — М.: Стройиздат, 1977. — 40 с.

9. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей. — М.: Энергия, 1977. — 288 с.

10. **Носова О. Н.** Фильтрационный контроль гидротехнических сооружений. — Гидротехническое строительство, 1981, № 3, с. 48 — 51.

11. **Вербецкий Г. П.** Прочность и долговечность бетона в водной среде. — М.: Стройиздат, 1976. — 129 с.

12. **Золотов Л. А., Царев А. И., Хейфиц В. З.** и др. — Разработка и внедрение методов и средств контроля состояния сооружений, оснований и оборудования ГЭС и ГАЭС. — Гидротехническое строительство, 1981, № 7, с. 2 — 6.

13. **Указания** по организации натурных наблюдений и исследований на строящихся гидротехнических сооружениях: ВСН 01-74, МЭиЭ СССР/ВНИИГ. — Л.: Энергия, 1974. — 24 с.

14. **Инженерно-геологические** изыскания для строительства гидротехнических сооружений. — М.: Энергия, 1980. — 344 с.

15. **Руководство** по гидрохимическим исследованиям при изысканиях для гидротехнического строительства, П 655-77./Гидропроект. — М., 1978. — 64 с.

16. **Лыкошин А. Г.** Карст и гидротехническое строительство. — М.: Стройиздат, 1968. — 184 с.

17. **Руководство** по методике определения фильтрационно-суффозионных свойств скальных оснований гидротехнических сооружений: П 28-74/ВНИИГ. — Л., 1975. — 76 с.

18. **Марвик Р.** Гидроузел комплексного назначения на р. Лар (Иран), ч. 2. — Экспресс-информация./ВИНИТИ. Сер. Гидроэнергетика, 1975, вып. 32, реф. 198, с. 1 — 7.

19. **Петросян Г. М., Симонян А. А.** Крепление туннеля, сооружаемого в неустойчивых грунтах. — Шахтное строительство, 1980, № 3, с. 29.

20. **Инструкция** и методические указания по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытных откачек из скважин: И-38-67/Гидропроект. — М., 1967. — 184 с.

21. **Руководство** по определению водопроницаемости скальных пород методом опытных нагнетаний воды в скважины: П-656-75/Гидропроект. — М., 1978. — 48 с.

22. **Насберг В. М., Илюшин В. Ф.** Об учете давления подземных вод на обделки напорных туннелей и шахт. — Гидротехническое строительство, 1975, № 6, с. 34 — 38.

23. **Насберг В. М.** Фильтрация без подпора из горизонтальной цилиндрической выработки в ненасыщенный водой грунт. — Известия ТНИСГЭИ, т. 10, 1958, с. 26 — 39.

24. **Петрашень Р. Н.** Противодавление воды на подошве гидротехнических сооружений в предельных расчетных состояниях. — Гидротехническое строительство, 1981, № 7, с. 33 — 36.

25. **Илюшин В. Ф.** Снижение металлоемкости конструкций затворных камер. — Гидротехническое строительство, 1975, № 10, с. 42.

26. **Василевский Г. А.** Опыт эксплуатации Теребля-Рикской гидростанции. — Гидротехническое строительство, 1966, № 6, с. 4 — 9.

27. **Пёльман В., Манг Ф.** Система водоводов ГАЭС Вальдек II (ФРГ), ч. 2. — Экспресс-информация/ВИНИТИ. Сер. Гидроэнергетика, 1975, № 6, с. 7 — 12.

28. **Гончарук П. П., Логачев Н. Т.** О гидростатических нагрузках на крепь шахтных стволов. — Шахтное строительство, 1978, № 12, с. 19.

29. **Алиферов А. Н.** Обделка Ялтинского гидротехнического туннеля. — Гидротехническое строительство, 1966, № 9, с. 10 — 13.

30. **Проектирование** и строительство больших плотин. Вып. 6./Жиленков В. Н. Фильтрационные исследования плотин и их оснований/Под ред. Л. А. Борового. — М.: Энергоиздат, 1982. — 104 с.

31. **Технические** указания по установке контрольно-измерительных приборов в бетонные гидротехнические сооружения, производству отсчетов и первичной их обработке/ВНИИГ. — Л., 1964. — 124 с.

32. **Временные** указания по проведению контрольных наблюдений и исследований на плотинах из местных материалов во время их возведения и эксплуатации: ВСН 35-70/ВНИИГ. — Л., 1971. — 44 с.

33. **Методические** рекомендации к составлению проекта размещения контрольно-измерительной аппаратуры в бетонных гидротехнических сооружениях: П 41-70/ВНИИГ. — Л., 1972. — 101 с.

34. **Пособие** по методике обработки данных натурных исследований гидротехнических сооружений/ВНИИГ. — Л., 1975. — 150 с.

35. **Эйдельман С. Я.** Натурные исследования бетонных гидротехнических сооружений. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1960. — 210 с.

36. **Гинзбург М. Б.** Натурные исследования крупных гидротехнических сооружений. — Л.: Энергия, 1964. — 359 с.

37. **Эйдельман С. Я.** Натурные исследования плотины Братской ГЭС. — Л.: Энергия, 1968. — 256 с.

38. **Материалы** конференций и совещаний по гидротехнике: Натурные исследования как средство оперативного контроля безопасной работы гидротехнических сооружений/ВНИИГ. — Л., 1980. — 180 с.

39. **Разработка** каталога по выбору рациональных конструкций пьезометров для трещиноватых скальных оснований. — Научные исследования по гидротехнике в 1969 году, том I/ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — Л., 1970. — 142 с.

40. **Каталог** контрольно-измерительных приборов, выпускаемых странами — членами СЭВ для натурных исследований гидротехнических сооружений. Совет экономической взаимопомощи. Постоянная комиссия по электроэнергетике. Секция 3 по гидроэлектростанциям./НИС Гидропроекта. — М., 1971. — 116 с.

41. **Сандрони С. С.** Простой, точный и надежный уровнемер. — Реф. журн.: Геология, разд. 08Е Гидрогеология, реф. 2Е35, 1981, № 2.

42. **Гонек Н. Ф.** Манометры. — Л.: Машиностроение, 1979. — 147 с.

43. **Малышев Л. И., Максимов К. И., Сташевская Н. А.** Контроль фильтрации в скальных основаниях высоконапорных плотин. — Материалы конференций и совещаний по гидротехнике: Натурные исследования как средство оперативного контроля безопасной работы гидротехнических сооружений/ ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — Л., 1980, с. 87 — 94.

44. **Арутюнян Р. Н.** Приборы для измерения порового давления в грунте. Вакуум-пьезометр. — Основания, фундаменты и механика грунтов, № 2, с. 27.

45. **Боголюбов К. С.** Приборы для измерения порового давления в грунте. Пневматический прибор. — Основания фундаменты и механика грунтов, 1962, № 2, с. 27 — 28.

46. **Прибор** для измерения порового давления в основании арочной плотины Цервреила (Швейцария). — РЖЭ, 1981, реф. 11Д 190.

47. **Петрашень Р. Н.** Чувствительность пьезометров бетонных гидротехнических сооружений. — Труды Гидропроекта, 1963, № 8.

48. **Насберг В. М.** О выборе типа пьезометра для измерения напоров воды в основании и теле гидротехнических сооружений. — Труды координационных совещаний по гидротехнике/ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1965, вып. 19, с. 204 — 226.

49. **Насберг В. М.** Краткие итоги исследований гидротехнической лаборатории по фильтрации. — Известия ТНИСГЭИ, 1962, т. 14, с. 80 — 144.

50. **Инструкция** и методические указания по определению водопроницаемости горных пород методом опытных нагнетаний в скважины. И-39-67/Гидропроект, 1968. — 96 с.

51. **Справочник** по инженерно-геологическим работам по изысканиям для гидроэнергетического строительства/Гидроэнергопроект. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1955. — 104 с.

52. **Указания** по проектированию дренажа подземных гидротехнических сооружений: ВСН 045-72/Главниипроект. — М., 1973. — 116 с.

53. **Насберг В. М.** Фильтрационный расчет шпурового дренажа, служащего для разгрузки облицовки туннелей и шахт от давления грунтовых вод. — Известия ТНИСГЭИ, 1965, т. 16, с. 116 — 139.

54. **Насберг В. М., Илюшин В. Ф.** Фильтрационные расчеты туннелей и шахт при наличии вокруг них цементации. — Гидротехническое строительство, 1973, № 11, с. 39 — 45.

55. **Шпуровой** дренаж и противофильтрационная цементация в подземных гидротехнических сооружениях. Библиотека гидротехника и гидроэнергетика, вып. 61/В. Ф. Илюшин, В. М. Насберг, Г. А. Беручашвили и др. — М., Энергия, 1978. — 105 с.

56. **Жебелев Ю. А.** Модернизация контроля и устройств оперативного контроля за гидротехническими сооружениями Братской ГЭС за период 1968 — 1978 г. — Материалы конференций и совещаний по гидротехнике: Натурные исследования как средство оперативного контроля безопасной работы гидротехнических сооружений/ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1980, с. 139 — 144.

57. **Киясбейли А. Ш., Лифшиц Л. М.** Первичные преобразователи систем измерения расхода и количества жидкостей. — М.: Энергия, 1980. — 80 с.

58. **Левелев А. Г., Марголина О. Г., Цареградская Г. Ф.** Исследование фильтрации на Чарвакском гидроузле. — Гидротехническое строительство, 1981, № 1, с. 42 — 43.

59. **Насберг В. М., Илюшин В. Ф.** К вопросу натурных исследований действительных размеров и проницаемости зоны противофильтрационной цементации в напорных туннелях и шахтах. — В кн.: Сборник научно-технических статей ГрузНИИЭГСа, вып. 5 (60). Гидротехническое строительство в горных условиях. — М.: 1977, с. 10 — 16.

60. **Указания** по методике натурных наблюдений химической суффозии в основаниях гидротехнических сооружений: ВСН 12-67/ВНИИГ. — Л., 1968.

61. **Калачев Б. Б., Чечот В. З.** О выпадении нерастворимых солей в дренажных скважинах гидротехнических сооружений. — Энергетическое строительство, 1973, № 2, с. 45 — 46.

62. **Исследования** конструкций подземных сооружений и окружающих их скальных пород/Л. Ф. Фурсов, А. Ш. Гобечия, А. Ш. Папинян и др. — Л.: Энергия, 1975. — 80 с.

63. **Дандурова К. М., Окроквердхишвили Н. В., Чумбуридзе Г. К.** Натурные исследования упругого отпора горных пород и фильтрации в круглоцилиндрических выработках на трассе турбинных водоводов Ингури ГЭС. — Труды координационных совещаний по гидротехнике: Натурные исследования гидротехнических сооружений. Дополнительные материалы/ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1975, с. 18 — 23.

64. **Туннели** железнодорожные, автодорожные и гидротехнические. Метрополитены. Часть III. Правила производства и приемки работ, глава 44: СНиП III-44-77. — М.: Стройиздат. 1977. — 88 с.

65. **Чумбуридзе Г. К.** Фильтрационные потери воды из гидротехнических напорных туннелей. — Известия ТНИСГЭИ, 1970, т. 20, с. 261 — 274.

66. **Указания** по проектированию цементации в гидротехнических туннелях: ВСН 03-74/ВНИИГ. — Л., 1975. — 25 с.

67. **Проектирование** и строительство больших плотин. Вып. I. Подземные работы и улучшение скальных оснований плотин. — По материалам VII и VIII Международных конгрессов по большим плотинам/Составили: Эристов В. С. и Мазур А. М. — М. — Л.: Энергия, 1966. — 204 с.

68. **Золотаревская М. М.** Натурные исследования в опытных подземных выработках. — Энергетическое строительство за рубежом, 1973, № 4, с. 29—32.

69. **Технические** условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Цементация в гидротехнических туннелях: ВСН-022-69/ВНИИГ. Л., 1971. — 102 с.

70. **Чилингаришвили Г. И.** Современные методы и средства натурных исследований подземных гидротехнических сооружений. — Труды координационных совещаний по гидротехнике: Натурные исследования гидротехнических сооружений/ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — Л., 1971, вып. 63, с. 23 — 33.

71. **Адамович А. Н.** Закрепление грунтов и противофильтрационные завесы в гидротехническом строительстве. — М.: Энергия, 1980. — 320 с.

72. **Литвин А. Н.** Ускоренный метод оценки водопроницаемости бетона в сооружениях. — Гидротехническое строительство, 1959, № 2, с. 53 — 54.

73. **Рекомендации** по оценке качества бетона гидротехнических сооружений по кернам: ВСН 008-67/ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — Л.: Энергия, 1968. — 48 с.

74. **Бетоны.** Метод определения коэффициента фильтрации воды: ГОСТ 19426-74. — М.: Изд-во стандартов, 1974. — 12 с.

75. **Инъекционные** работы в напорных гидротехнических туннелях и водоводах: Инструкция по проектированию и производству инъекционных работ/ В. Йоксич, Б. Куюнджич, Р. Николич и др. — Л.: Энергия, 1974. — 94 с.

76. **Илюшин В. Ф., Насберг В. М.** Определение утечек воды из напорных подземных водоводов, — Энергетическое строительство, 1977, № 9, с. 22 — 25.

77 **Методические** указания по натурным исследованиям фильтрации в трещиноватых скальных основаниях: ВСН 33-70/ВНИИГ. — Л., 1971. — 62 с.

78. **Илюшин В. Ф., Количко Н. В.** Влияние инженерно-геологических факторов на компонирование и конструктивные решения подземных сооружений напорно-станционного узла Рогунской ГЭС. — В кн.: Сборник научных трудов Гидропроекта. М., 1981, вып. 78. — 238 с.

79. **Осадчий Л. Г., Бахтиаров Р. И.** Рогунский гидроузел на реке Вахш. — Гидротехническое строительство, 1975, № 4, с. 10 — 13.

80. **Илюшин В. Ф.** Дренаж подземных сооружений Нурекской ГЭС. — Гидротехническое строительство, 1972, № 11, с. 11 — 16.

81 **Терновский И. Н., Ксенофонтов В. К.** Натурные наблюдения в туннеле катастрофического водосброса Нурекской ГЭС. — Гидротехническое строительство, 1980, № 5, с. 65 — 68.

82. **Серков В. С.** Совершенствование контроля за надежностью гидротехнических сооружений электростанций. — Гидротехническое строительство, 1980, № 1, с. 34 — 35.

83. **Насберг В. М., Илюшин В. Ф.** Новые способы исследования фильтрации воды и трещинообразования в обделках напорных туннелей. Гидроэнергетическое строительство в горных условиях. — В кн.: Сборник научно-технических статей ГрузНИИЭГСа. М., 1980, вып. 7, с. 9 — 15.

84. **Клингерт Н. В.** и др. Стальные трубопроводы гидроэлектростанций. — М.: Энергия, 1973. — 216 с.

85. **Правила** инспекций и наблюдений за плотинами (Франция). Реферат 64/Р. Р. Тиздель. — Экспресс-информация/ВНИИТИ. Сер. Гидроэнергетика. 1975, № 10, с. 5 — 9.

86. **Илюшин В. Ф., Насберг В. М.** Натурные исследования давления подземных вод на обделки туннелей. — Гидротехническое строительство, 1975, № 4, с. 23 — 25.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
1. Общие положения 7
2. Исследование естественных подземных вод в период изысканий и строительства 18
3. Наблюдения и исследования силового воздействия подземных вод 22
4. Наблюдения за притоком воды в подземные сооружения . . 59
5. Наблюдения за трещинообразованием и утечками воды в туннелях и шахтах 68

Приложения

Приложение 1. Краткие сведения о приборах, применяемых НИСом Гидропроекта для натурных фильтрационных исследований 77
Приложение 2. Проект размещения фильтрационной КИА на участке подземного здания Рогунской ГЭС 80
Приложение 3. Фильтрационная КИА в эксплуатационном (катастрофическом) водосбросе с глубинным водозабором Нурекской ГЭС 87
Приложение 4. Примеры наблюдений за фильтрацией воды в туннелях 93
Приложение 5. Устройства и способы для наблюдения за трещинообразованием и утечками воды в туннелях 95
Приложение 6. Определение утечек воды при наличии вокруг туннелей зацементированной породы 125
Приложение 7. Примеры эпюр остаточных напоров подземных вод на обделки туннелей и расчетные формулы 129

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАТУРНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ И ИССЛЕДОВАНИЯМ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОДЗЕМНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

П 10—83
ВНИИГ

Научный редактор *В. Н. Жиленков*
Редактор *А. А. Гайдина*
Технический редактор *Т. М. Бовичева*

Сдано в набор 15.09.83. Подписано к печати 30.12.83.
М-29539. Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 1.
Литературная гарнитура. Высокая печать. Печ. л. 9,0.
Уч.-изд. л. 9,31. Тираж 650. Заказ 364. Цена 1 р. 40 к.

Типография ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева,
195220, Ленинград, Гжатская ул., 21.