

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

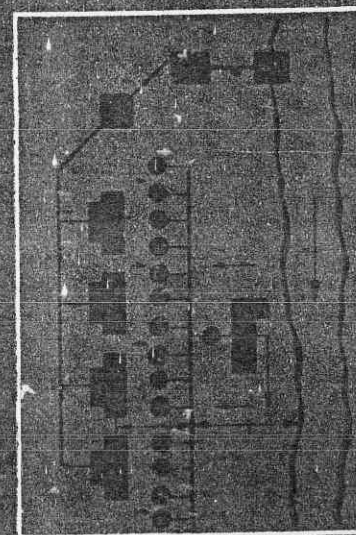
Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

Н. А. Плотников

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
СИСТЕМ
ИСКУССТВЕННОГО
ВОСПОЛНЕНИЯ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД
ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ



МОСКВА
СТРОЙИЗДАТ

Н. А. ПЛОТНИКОВ

*д-р техн. наук, проф.,
Лауреат Государственной премии*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
СИСТЕМ
ИСКУССТВЕННОГО
ВОСПОЛНЕНИЯ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД
ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ



Москва
Стройиздат
1983

Печатается по решению секции литературы по инженерному оборудованию редакционного совета Стройиздата.

Рецензент — д-р техн. наук Я. Я. Спрогис.

Плотников Н. А.
П 39 Проектирование систем искусственного восполнения подземных вод для водоснабжения.— М.: Стройиздат, 1983.— 232 с., ил.

Рассмотрены вопросы проектирования систем искусственного восполнения подземных вод (ИВПВ). Приведены обоснование выбора разных типов таких систем и расчет отдельных их элементов, а также описана их работа во взаимосвязи с системой водоснабжения в целом. Проанализировано влияние природных условий на выбор схемы ИВПВ. Рассмотрено использование этих условий без проведения сложных инженерных мероприятий и, в частности, для управления запасами подземных вод в водоносных горизонтах. Приведены экономическое обоснование и примеры эффективности использования систем ИВПВ.
Для инженерно-технических работников изыскательских и проектных организаций.

П 3302000000—388
047(01)—83 191—82

ББК 38.761.1
6С9.3

© Стройиздат, 1983

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года, принятых XXVI съездом КПСС, указано на необходимость усиления поиска и разведки подземных вод.

Последнее время за рубежом в ряде стран, а для некоторых районов и у нас в СССР получение воды хорошего качества в достаточном количестве для хозяйственно-питьевого водоснабжения становится все более трудной задачей.

В настоящей работе основное внимание уделяется использованию искусственного восполнения подземных вод (ИВПВ) для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Кроме того, ИВПВ применяют для пищевой промышленности, где требуется вода питьевых кондиций, а также для ирригации, обводнения пастбищ и других целей.

В развитие «Основ водного законодательства СССР и союзных республик», утвержденных в 1970 г., где предусмотрены порядок использования и охраны вод от загрязнения и истощения, на сессии Верховного Совета СССР в сентябре 1972 г. принято постановление о мерах по дальнейшему улучшению охраны природы и рациональному использованию природных ресурсов.

На ноябрьском (1982 г.) Пленуме ЦК КПСС было отмечено, что одна из главных задач одиннадцатой пятилетки—более рациональное использование производственного потенциала страны, всемерная экономия всех видов ресурсов, охрана природной среды в интересах людей нынешних и грядущих поколений. На эти цели в текущей пятилетке предусмотрено израсходовать более 10 млрд. руб. государственных капитальных вложений.

При проектировании систем ИВПВ необходимо разрабатывать наиболее экономичные и эффективные технические решения с рациональным использованием существующих водозаборов и оборудования. Ряд задач, связанных с проектированием систем ИВПВ, решен, но до последнего времени не были объяснены процессы, происходящие в пленке инфильтрационных бассейнов, а также микробиологические процессы, влияющие на улучшение качества воды.

За последние годы в СССР опубликовано большое число работ по ИВПВ.

Однако во многих работах с недостаточной полнотой рассмотрены вопросы взаимодействия гидрогеологических, гидрологических, технических и санитарно-гигиенических условий эксплуатации ИВПВ. Эти вопросы рассматриваются в настоящей работе. При проектировании ИВПВ предусматривается комплексный учет климатических, гидрогеологических и гидрологических, технических и санитарно-гигиенических условий, при максимальном использовании имеющихся водозаборов подземных вод с оборудованием, а также в комплексе с водопроводом в целом.

Некоторые вопросы, например предварительное и последующее улучшение качества воды, бурение скважин, автоматизация и другие специфические вопросы, детально не рассматриваются; они изложены в специальной литературе.

В настоящей работе обращается внимание на максимальное использование природных условий, которые определяют схему ИВПВ и в значительной степени могут удешевить последнюю. Специфическими особенностями проектирования ИВПВ для водоснабжения при использовании поверхностной воды для восполнения подземных вод в инфильтрационных бассейнах и других сооружениях является расчет количества воды и улучшения ее качества, а при инфильтрации в напорные горизонты особое внимание обращается на водоподготовку и расчет поглощающих скважин. Кроме того, расчет водозаборов подземных вод усложняется появлением новых условий — искусственным восполнением подземных вод. Эти вопросы являются основными, но с ними увязан целый ряд дополнительных вопросов, определяющихся также спецификой ИВПВ.

В данной работе главу VI написал К. С. Боголюбов, главу VII — Н. Н. Лапшин, главы VIII и IX — В. С. Алёксеев и Г. М. Коммунар; глава XII написана Н. А. Плотниковым при участии В. М. Берданова.

За ценные замечания, сделанные при рецензировании работы, автор приносит благодарность Я. Я. Спрогису и за помощь при оформлении работы А. П. Ткаченко и Л. А. Субботиной.

Глава I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПОЛНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (ИВПВ)

1. НАЗНАЧЕНИЕ СИСТЕМ ИВПВ

Последние данные по изучению эксплуатации подземных вод приводят к выводу, что в большинстве случаев при формировании эксплуатационных запасов подземных вод, т. е. расхода, получаемого рациональными водозаборами, естественный расход подземных вод составляет небольшую часть, а в ряде случаев практически равен нулю. Часто эксплуатационные запасы формируются в основном за счет поверхностных вод и для ряда водозаборов из артезианских горизонтов (например, Киев). Это характерно для береговых инфильтрационных водозаборов, когда почти все их основное питание получается из поверхностных вод через водоносный горизонт. Питание (восполнение) подземных вод происходит за счет поверхностных вод в районе водозаборов и даже на отдельном его участке без специальных дополнительных инженерных мероприятий.

При ИВПВ ставится задача улучшить или полностью обеспечить восполнение подземных вод при их эксплуатации, используя простые инженерные мероприятия, и тем самым увеличить их отбор и получить воду хорошего качества для водоснабжения. При недостаточном расходе поверхностных вод в отдельные периоды удается создать запасы подземных вод, чтобы использовать их регулирующую емкость. Это нередко обходится дешевле строительства водохранилищ поверхностных вод. Кроме того, искусственное восполнение подземных вод при определенных условиях может предохранить поступление соленых вод в водоносный горизонт. При эксплуатации ИВПВ возможно повышение уровня подземных вод, что способствует сохранению экологической среды, например леса в районе водозаборов подземных вод.

Задача ИВПВ — получить большой расход водозабора, восстановить и даже создать дополнительные эксплуатационные запасы подземных вод больших по площади районов (Крым, СССР; Калифорния, США). Важной задачей ИВПВ является улучшение качества исходной поверхностной воды. Чем лучше качество исходной воды, тем больше упрощаются сооружения для ее очистки и снижается стоимость последней.

Искусственное восполнение подземных вод из поверхностных — относительно дешевый способ получения кондиционных питьевых вод. Искусственно восполняемые подземные воды, как и подземные воды питьевого качества, используются в первую очередь для хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также для пищевой промышленности. Подземные, главным образом артезианские воды, применяют и для кондиционирования воздуха. При этом отработанные воды с повышенной температурой сбрасывают часто в тот же водоносный горизонт (Москва, Нью-Йорк и др.). В таких случаях необходимо учитывать возможность повышения температуры подземных вод. Искусственно восполняемые подземные воды могут расходоваться для сельскохозяйственно-питьевого водоснабжения и в особенности для молочных ферм. Таким образом, при искусственном восполнении подземных вод во всех названных случаях ставится задача бесперебойно удовлетворять потребности в воде кондиционного качества. Следует иметь в виду, что довести до кондиций по качеству искусственно восполняемые подземные воды можно до подачи к потребителю дополнительным их улучшением, чаще всего хлорированием, например по бактериальным показателям, и другими способами.

На рис. 1 показана одна из схем восполнения подземных вод из поверхностных с применением инфильтрационных бассейнов и одновременно береговой инфильтрации.

Вода, поступившая из реки в водозабор, подкачивается насосной станцией I подъема на сооружения для предварительного улучшения качества воды. Водоносный слой грунтовых вод приурочен к пескам и имеет мощность H . У поверхности земли их покрывает двухметровый слой суглинков. Водоносный горизонт связан непосредственно с рекой. До искусственного восполнения ранее был устроен береговой инфильтрационный водозабор из скважин на расстоянии L_p от реки. С увеличением потребности в воде, а также в связи с выявившейся и прогрессирующей кольматацией русла реки целесообразно было бы увеличить расход водозабора искусственным восполнением подземных вод. Таким образом, вода поступает в водозабор из реки (см. рис. 1, б) без отрыва уровня грунтовых вод от ее дна и со стороны инфильтрационных бассейнов, сохраняя зону аэрации под дном инфильтрационного бассейна.

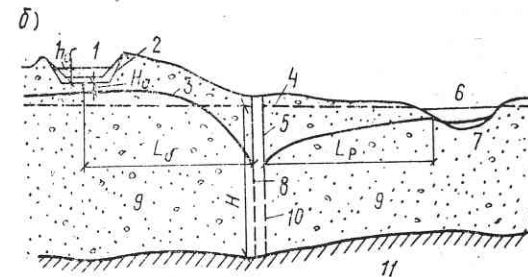
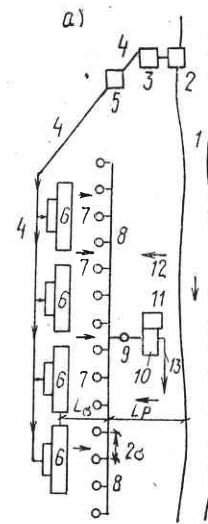


Рис. 1. Схема ИВПВ открытого I типа из поверхностных вод с инфильтрационными бассейнами и береговой инфильтрацией

а — в плане: 1 — река (озеро, водохранилище); 2 — водозабор из поверхностных вод; 3 — насосная станция I подъема; 4 — трубопровод; 5 — сооружения для предварительного улучшения качества воды; 6 — инфильтрационные бассейны; 7 — скважины водозабора; 8 — водозабор подземных вод из скважин; 9 — регулирующий резервуар; 10 — насосная станция II подъема; 11 — сооружения для последующей очистки с хлорированием; 12 — водоносный горизонт; 13 — водовод от насосной станции II подъема к потребителю (стрелками показано направление движения воды)

б — вертикальная: 1 — инфильтрационный бассейн; 2 — илтистая пленка в инфильтрационном бассейне; 3 — уровень грунтовых вод при инфильтрации из бассейнов и откачке из скважин; 4 — естественный уровень грунтовых вод при среднем уровне в реке; 5 — скважина водозабора; 6 — река; 7 — закольматированный слой в русле реки; 8 — динамический уровень воды в скважине; 9 — водоносный горизонт в песчано-гравийных отложениях; 10 — фильтр скважины; 11 — глины

Такая же схема (береговая инфильтрация и ИВПВ) может быть целесообразной для получения большего расхода. Из скважин рис. 1, а водозабора с погружными электронасосами вода поступает в регулирующий резервуар, откуда вода насосной станции II подъема сначала подается на сооружения последующей очистки, а затем по водоводу — к потребителю. Расстояние от реки и инфильтрационных бассейнов до линейного водозабора принимается 50 м и более при водоносном пласте из мелких песков, до 100—200 м (редко больше) для средних и крупных песков, и в галечниках. Мощность зоны аэрации H_a при эксплуатации весьма желательно иметь не менее 2—3 м.

Схемы расположения скважин, сооружений предварительной и последующей очистки воды, резервуаров и насосных станций могут приниматься и другие.

2. ТИПЫ СИСТЕМ ИВПВ

По гидрогеологическим и техническим условиям можно выделить три основные типа искусственного восполнения подземных вод:

I тип — открытое, при поверхностной фильтрации из инфильтрационных бассейнов, каналов;

II тип — закрытое, при фильтрации через скважины, колодцы;

III тип — простое, при поверхностной фильтрации с использованием естественных или нарушенных условий и их небольших улучшений.

При I типе искусственного восполнения (открытом) используются грунтовые воды первого от поверхности водоносного горизонта, не перекрытого сверху водонепроницаемыми породами или при мощности последних не более 3—5 м. Инфильтрация воды для восполнения может происходить, например, в бассейнах и канавах. Для одной из схем ИВПВ с инфильтрационными бассейнами (см. рис. 1,б) вода поступает из реки. При небольшой мощности водоносного слоя (обычно не более 6—8 м) вместо водозаборных скважин закладывают горизонтальные водозаборы. В некоторых случаях более целесообразным оказывается лучевой водозабор (из горизонтальных скважин), например в системе ИВПВ Сойовицы—Караны для водоснабжения Праги в Чехословакии; расход этого водозабора составляет 15,6 тыс. м³/сут воды.

Подъем воды из скважин может осуществляться сифоном, всасывающим насосами и погружными центробежными электронасосами; другие виды водоподъемников в настоящее время применяются в исключительных случаях.

При II типе искусственного восполнения (закрытом) эксплуатируются водоносные пласты при глубоком их залегании, отделенные от поверхности земли водоупорными слоями, или при грунтовых водах, залегающих сравнительно неглубоко, но отдельных от поверхности земли достаточно мощными (более 5 м) водоупорными слоями.

На рис. 2 показана в плане схема системы ИВПВ II типа из двух рядов скважин, которые с помощью задвижек могут попеременно служить инфильтрационными и водозаборными; это в ряде случаев является весьма желательным, но несколько усложняет систему подачи воды в скважины и откачки из них. Применяют и другие схемы, в которых поглощающие и водозаборные скважины являются по назначению постоянными. Такая схема проще, но КПД ее чаще ниже, чем схемы на рис. 2.

Системы ИВПВ I типа при фильтрации с поверхности земли встречаются чаще, так как они более дешевые, чем системы ИВПВ II типа.

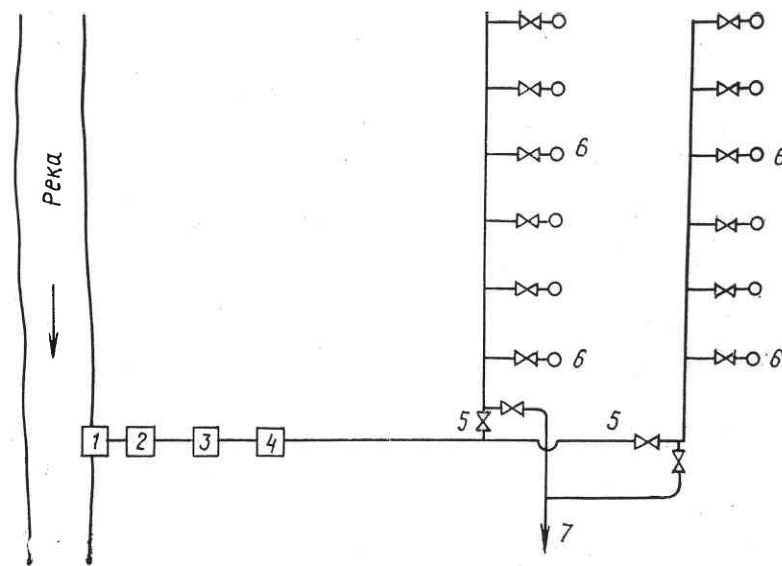


Рис. 2. Схема ИВПВ закрытого типа из поверхностных вод

1 — водозабор из поверхностных вод; 2 — насосная станция I подъема; 3 — сооружения для очистки воды; 4 — насосная станция II подъема; 5 — задвижки; 6 — инфильтрационные (поглощающие) и водозаборные скважины; 7 — водовод к потребителю

III тип ИВПВ является наиболее простым; предварительное улучшение качества воды не применяется. По схеме ИВПВ III типа максимально используются естественные условия (старицы, затопление низких террас) и нарушенные условия (дополнительная фильтрация поверхностных вод в подземные при устройстве плотин, водохранилищ, каналов и проч.) с недорогими улучшениями.

Кроме названных типов систем ИВПВ применяют системы ИВПВ с инфильтрацией через травяные покрытия, которые получили распространение в ГДР. В травяных бассейнах слой воды небольшой — до десятков сантиметров, а вода для инфильтрации может в них подаваться с повышенной мутностью по сравнению с системами I типа. Инфильтрационные сооружения с травяными покрытиями устраивают в виде неглубоких инфильтрационных бассейнов, в которых дно покрывают дерном из трав, не боящихся подтопления в теплое время года, а зимой затопления; на лугах используют естественные понижения и при необходимости устраивают ограждения с валиками.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ИВПВ В СССР И ЗА РУБЕЖОМ

Опыт исследований эксплуатации ИВПВ описан в ряде отечественных [5, 28 и др.] и зарубежных работ.

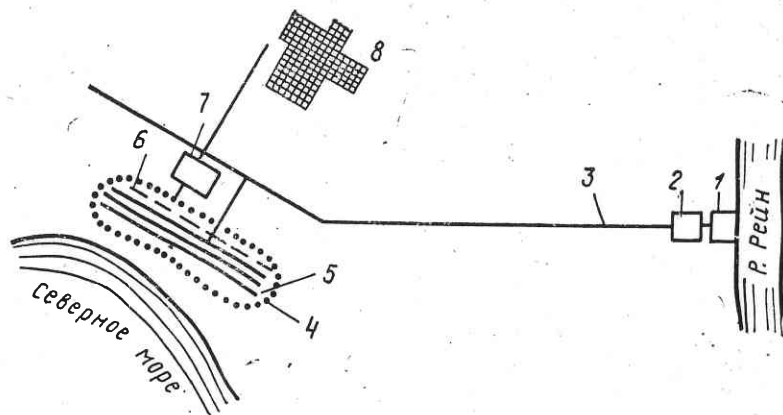


Рис. 3. Схема ИВПВ открытого I типа из р. Рейн в районе Амстердама в Голландии

1 — водозабор из р. Рейн с насосной станцией; 2 — очистные сооружения (скорые фильтры и хлорирование); 3 — водоводы; 4 — район дюн; 5 — инфильтрационные каналы в дюнах; 6 — водозабор из скважин; 7 — последующее улучшение качества воды (обезжелезивание); 8 — г. Амстердам

Опубликовано несколько исследований работы систем ИВПВ, доложенных на Международном симпозиуме по подземным водам в Вильнюсе в июле 1979 г. [17].

Следует отметить, что поверхностные воды еще в античное время в засушливых районах собирали в полых цистернах, позже эти цистерны стали заполнять песком и гравием, чтобы длительное время сохранять чистую воду. Этот способ включал не только искусственное восполнение запасов подземных вод, но и создание по существу небольших искусственных подземных емкостей. Еще недавно в Венеции в 1400 цистернах (с песком) запасали 200 тыс. м³ воды.

За рубежом ИВПВ начали особенно широко применять последние десятилетия. В Рурской области (ФРГ) за последние 10 лет число систем ИВПВ увеличилось примерно в 5 раз. В ФРГ и некоторых других странах Западной Европы процент ИВПВ по отношению к использованию подземных вод составляют от 15—30 до 40% и более (Швеция). В Западной Европе распространена система ИВПВ с инфильтрационными бассейнами и нередко с подсыпкой песка. Водоснабжение Амстердама и ряда других объектов в Нидерландах основано на ИВПВ [41]. Вода плохого качества из р. Рейн (рис. 3) подается на скорые фильтры и хлорируется. Затем часть воды по водоводу диаметром 1500 мм и длиной 51 км транспортируется на дюны в инфильтрационные каналы. Далее вода забирается водозаборами из скважин и после обезжеле-

зирования и удаления марганца кондиционного качества поступает для водоснабжения г. Амстердама. Другая часть воды по водоводу диаметром 1200 мм, длиной 27 км направляется в систему ИВПВ для водоснабжения Северных Нидерландов. Из водоводов часть воды без ИВПВ забирается для производственного водоснабжения. Это пример районного водоснабжения с ИВПВ при использовании речной воды плохого качества, но с улучшением ее до кондиционного. Значительное участие в улучшении качества воды в указанном выше примере принимают инфильтрационные каналы и водоносный горизонт в песках. Вода получается более высокого качества и дешевле по сравнению с другими возможными вариантами схем водоснабжения Северных Нидерландов.

В США ИВПВ применяют почти во всех штатах с широким использованием простейших сооружений. Вода требуется для водоснабжения, орошения, кондиционирования воздуха, как загрязнение, препятствующее внедрению соленых грунтовых вод в эксплуатируемые пресные воды. Наиболее широко используют ИВПВ в Калифорнии.

Гидрогеологические условия в Калифорнии благоприятны: там имеются крупные аллювиальные бассейны с мощностью водоносных пород до нескольких сотен метров. Вместимость этих бассейнов определяют в 990 км³ воды. Самый крупный аллювиальный бассейн в долине р. Сакраменто с ее притоком р. Сан-Иокуин является основным источником орошения и водоснабжения в Калифорнии.

В 1965 г. подземных вод для водоснабжения и орошения в Калифорнии было получено 20 млрд. м³, т. е. около 50% всей потребляемой воды. К 2000 г. прогнозируется это потребление увеличить в 2 раза. Сначала эксплуатация подземных вод велась бессистемно и без надлежащего надзора. В связи с этим в долине р. Сан-Иокуин уровень подземных вод в 60-х годах упал с 2,5 до 60 м. В 1972 г. закончили строительство централизованного распределения искусственного восполнения вод в Калифорнии, включая сеть плотин для уменьшения паводковых пиков и эрозии, а также для осаждения взвешенных веществ; устроили ряд бассейнов для осветления воды. По данным 1957—1958 гидрологического года в США, искусственное восполнение составляло, %: в инфильтрационных бассейнах — 58,4, в руслах рек — 29,5, в каналах — 9,4, в скважинах — 1 (напорная инфильтрация), остальное в шурфах и путем затопления.

Сеть переброски воды с севера на юг Калифорнии имеет длину 700 км с расходом 850 м³/с. Только для центральной равнины при искусственном восполнении предусмотрена подземная емкость, вмещающая 35 млрд. м³ воды. В Южную Калифорнию вода подается по трубопроводам также из долины р. Колорадо и других источников. Система ИВПВ в долине р. Колорадо очень простая (III типа и частично I типа); довольно чистая речная вода фильтруется в русле и на низких террасах в аллювиальные отложения, затем собирается водозаборами и по водоводу длиной 500 км с расходом 45 м³/с транспортируется потребителю. Фильтрационные свойства аллювиальных отложений восстанавливаются промыванием осадка (пленки) и ее боронованием; вода очень дешевая. Наряду с этим в США, как отмечено, имеются системы ИВПВ с инфильтрационными бассейнами и немного со скважинами: работают опытные установки с использованием фекальных сточных вод (с обычной их очисткой и дополнительной доочисткой).

Во Франции в г. Круасси эксплуатируется система ИВПВ с исходной водой плохого качества из р. Сены; предварительная очистка воды выполняется очень фундаментально — микрофильтрованием, коагулированием, пропуском через активированный уголь, осветлением и скорой фильтрацией. На Международном конгрессе по водоснабжению в Токио качество получаемой воды в г. Круасси ухудшилось и ставится даже вопрос о закрытии этой системы. По имеющимся у нас данным, вероятной причиной ухудшения качества воды в системе ИВПВ г. Круасси является попадание грязных вод р. Сены в трещиноватый водоносный горизонт. Сводные данные о работе ИВПВ за рубежом опубликованы Бизе и др.

В СССР первое ИВПВ для водоснабжения было выполнено по схеме III типа в г. Арзамасе в конце XIX в. [20]. Последние десятилетия ИВПВ в СССР стало быстро развиваться. На большинстве объектов ИВПВ осуществляется через инфильтрационные бассейны, но имеется несколько систем с восполнением через инфильтрационные скважины. Расход систем ИВПВ на отдельных объектах чаще составляет десятки тысяч м³/сут, но имеются объекты с расходом до 120 и даже до 350 тыс. м³/сут (самая крупная в Европе система ИВПВ).

Вода, получаемая при ИВПВ, обычно дешевая, редко больше 2 коп. за 1 м³, а в долине р. Арагви вода стоит всего 0,7 коп. за 1 м³. Вода из всех систем ИВПВ в СССР получается высокого качества.

4. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ИВПВ В СССР

В СССР значительная часть эксплуатируемых систем для водоснабжения подземных вод приурочена к долинам рек* и при этом большинство водозаборов является береговыми инфильтрационными. При непрерывно увеличивающейся потребности населения в воде необходимо развивать существующие водозаборы. Одним из эффективных и дешевых способов увеличить расход береговых инфильтрационных водозаборов является дополнительное ИВПВ (см. рис. 1).

По данным работы [20] общий расход системы ИВПВ в 1970 г. составил 5—7 м³/с, или около 2,6% общего использования подземных вод. В случае повышения расхода систем до 115 м³/с к 2000 г. и при увеличении общего отбора подземных вод в 3 раза можно предположить, что процент ИВПВ по отношению к общей эксплуатации подземных вод повысится примерно до 14%. По другим данным указанные нами 14% несколько занижены.

Интересно отметить, что в ГДР для хозяйственно-питьевого водоснабжения за счет ИВПВ подается 15—18% общего использования подземных вод, а к 2000 г. планируется увеличить долю ИВПВ до 50%.

Глава II. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ИВПВ

1. КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Некоторые характеристики климата непосредственно, а другие косвенно влияют на работу сооружений искусственного восполнения подземных вод, а следовательно, и на выбор схемы такого восполнения. Особенно важно учитывать изменение метеорологических условий как сезонных, так и по годам.

Рассмотрим влияние отдельных метеорологических факторов и климата в целом. Обычно при мощности льда зимой не более 0,5 м можно устраивать открытые отстойники, инфильтрационные бассейны и др. В Сибири допускается толщина льда около 1 м.

Глубина инфильтрационных бассейнов при максимальном их наполнении составляет обычно 2—3 м. В суровом

* По разным данным до 35—65 % общего количества используемых подземных вод.

климате Севера СССР зимой открытые бассейны могут полностью промерзнуть. При этом следует учесть большую продолжительность зимы и, как правило, неэкономичность подогрева воды и устройства закрытых бассейнов. В связи с этим инфильтрация из открытых бассейнов в суровых климатических условиях Севера СССР пока не применяется. По-видимому, устраивать инфильтрационные бассейны в таких условиях можно для сезонного (летнего) питания надмерзлотных, межмерзлотных и даже подмерзлотных подземных вод. Иногда целесообразно сооружать специальные конструкции закрытых инфильтрационных бассейнов, а в некоторых случаях поглощающие (инфильтрационные) скважины. Все это требует соответствующих исследований и, в частности, гидрогеологического и технико-экономического обоснования с тепловыми расчетами.

В условиях умеренного климата, а также в южных районах СССР в зимний период инфильтрационные бассейны покрываются льдом только на поверхности без полного промерзания. При этом зимой инфильтрационный бассейн работает без очистки от ила и без опорожнения, в противном случае песчаное дно может промерзнуть. Следовательно, зимний период в суровых климатических условиях является важным инфильтрационным циклом, на который ведется расчет инфильтрации без перерыва для очистки; в районах с мягким климатом зима не лимитирует продолжительность инфильтрационного цикла, например на Черноморском побережье Кавказа.

Летом при солнечной радиации создаются благоприятные возможности при соответствующих других условиях развития планктона, донных растений и всевозможных организмов в инфильтрационных бассейнах, а также в реках и озерах. Для благоприятного развития планктона, донных растений и различных организмов необходима теплая вода. Однако и в холодных водах часто встречаются и развиваются водоросли. Днем водоросли выделяют кислород и поглощают углекислоту, ночью происходит обратный процесс. При отмирании и разложении водорослей вода приобретает неприятный привкус. Таким образом, влияние развития растений в инфильтрационных бассейнах и положительно и отрицательно. Этот вопрос нуждается в дальнейших исследованиях. В летний период с повышением температуры создаются более благоприятные условия для активизации микро- и макроорганизмов в зоне аэрации под инфильтрационным бассейном, а также в некоторых случаях и в грунтовых водах.

Сезонные изменения температуры воздуха влекут за собой довольно значительные годовые колебания температуры воды поверхностных источников искусственного восполнения подземных вод (рек и озер) до 25°C и более. Температура же искусственно восполняемых подземных вод колеблется менее значительно — до 5°C и несколько больше. Очень редко (данные В. В. Земляного и др.) колебания температуры таких подземных вод достигают 20°C [20]. В районах многолетней мерзлоты поверхностные воды в зимний период имеют температуру, близкую к нулю, а иногда совсем замерзают. Возможность снижения температуры поверхностной воды следует учитывать при проектировании предварительной водоподготовки и очищающей способности инфильтрационных бассейнов. Кроме того, изменение температуры воды необходимо вводить в расчет при определении скорости инфильтрации в бассейнах и фильтрации в водоносных породах. Таким образом, температурный фактор является одним из важных при искусственном восполнении подземных вод.

Количество осадков и распределение их в течение года также влияют на искусственное восполнение подземных вод, косвенно путем инфильтрации. Более заметно это влияние сказывается на режиме поверхностных вод (источник искусственного пополнения). Прямое же влияние осадков на расход инфильтрационных бассейнов очень незначительно: при осадках до 500—1000 мм/год, выпадающих непосредственно на поверхность инфильтрационного бассейна, процент их по сравнению с инфильтрацией (в среднем 1 м/сут) составит 0,15—0,3 за год. Величину испарения с поверхности бассейна можно принять равной количеству осадков, выпадающих за год. Учитывая разность осадков и испарения, их влиянием на расход инфильтрационных бассейнов можно пренебречь, а косвенное их влияние следует учитывать в гидрологических и гидрогеологических расчетах.

Солнечный свет благоприятствует уменьшению количества бактерий, в особенности кишечной палочки и патогенных. Летом он способствует ассимиляции углерода из воздуха в растениях, населяющих инфильтрационный бассейн. Под влиянием ветра в бассейне происходит волнение. При длине инфильтрационного бассейна 300—500 м и при сильном ветре высота волн может достигать до 0,5 м; при таких условиях даже пологие земляные откосы инфильтрационных бассейнов разрушаются, поэтому следует рассчитывать и откосы. Нередко откосы целесообразно крепить.

Кроме указанных метеорологических показателей, при проектировании искусственного восполнения требуются данные по глубине и времени промерзания.

2. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Гидрогеологические условия [14, 34] являются одними из самых важнейших при искусственном восполнении подземных вод, так как восполнение осуществляется в водоносном пласте и при этом учитываются свойства пласта, влияющие на улучшение качества воды. Наконец, в водоносном пласте создаются емкостные запасы подземных вод — иногда очень большие, иногда небольшие. В ряде случаев емкостные запасы не нужны совсем, так как водоносному пласту отводится только роль важного элемента в системе улучшения качества воды. Однако когда значительно ухудшается качество поверхностных вод, которыми искусственно восполняют подземные воды, и их исключают из системы восполнения, то для бесперебойного водоснабжения используют заранее создаваемые емкостные запасы подземных вод или рассчитывают в это время на увеличение береговой инфильтрации.

Наиболее благоприятными для искусственного восполнения являются подземные воды в долинах рек в аллювиальных отложениях, а иногда и в коренных породах (трещиноватый мел меловой системы в долине Северского Донца, под небольшим слоем аллювиальных песков), во флювиогляциальных отложениях и конусах выноса. В некоторых случаях целесообразно искусственное восполнение артезианских подземных вод (Крым и др.).

Гидрогеологические условия могут быть простыми. Примером может служить водоносный горизонт в аллювиальных отложениях мощностью около 15—40 м, представленных песчано-гравийными отложениями с мало изменяющимися фильтрационными свойствами, протянутый вдоль реки под первой надпойменной широкой террасой. Гидрогеологические условия осложняются наличием глинистых прослоев и значительно меняющимся коэффициентом фильтрации. Дополнительным осложнением может быть перетекание снизу из напорных соленых вод при понижении уровня воды в эксплуатируемом горизонте, например на 6—8 м. Для водоносных напорных горизонтов нередко необходимо учитывать связь с ниже и выше лежащими водоносными горизонтами.

При анализе гидрогеологических условий следует учитывать их изменчивость по площади распространения и

по глубине. Например, для аллювиальных отложений долин рек в связи с условиями их образования коэффициенты фильтрации в вертикальном направлении значительно ниже, чем в горизонтальном направлении; среди отложений с хорошими фильтрационными свойствами нередко встречаются тонкие и очень тонкие глинистые прослои, которые не всегда обнаруживаются при разведочных работах, но очень ухудшающие поверхностную инфильтрацию при ИВПВ и, в частности, при инфильтрационных бассейнах.

Фильтрационные условия по длине долин рек обычно заметно изменяются в верхней части этих долин и коэффициенты фильтрации аллювия значительно больше, чем вниз по течению, а мощности аллювия, наоборот, в верхнем течении рек меньше, а в нижнем больше. Особенно заметно это для горных речек при уменьшении продольных уклонов вниз по течению. В некоторых долинах в связи с особенностями геологического строения ниже по течению реки от узкой части долины при переходе в широкую часть и при этом с меньшим продольным уклоном поверхностный сток особенно заметно уменьшается в межень, просачиваясь в накопления аллювия и увеличивая подземный сток, например в долине р. Сочи ниже Пластунских ворот.

При обосновании выбора схемы искусственного восполнения подземных вод и при расчетах для каждого участка следует давать конкретную оценку гидрогеологических условий залегания и распространения подземных вод, граничных условий, учитываемых параметров водоносных пластов — коэффициента фильтрации, активной пористости, водопроводимости, уровнепроводности или пьезопроводности, а также оценивать показатели качества подземных вод, изменчивость условий, параметров и качества воды при эксплуатации. Кроме того, для оценки грунтовых вод необходимо иметь сведения о строении и параметрах зоны аэрации. При этом следует учитывать не только наблюдаемые гидрогеологические условия, но анализировать и предусматривать их изменение при эксплуатации, что, к сожалению, не всегда делается. Например, почти не учитывают увеличение со временем заиленности русел рек, что при береговой инфильтрации в дальнейшем ведет к снижению расхода водозаборов.

Например, маломощный водоносный слой песков с небольшим площадным распространением при большой потребности в воде неблагоприятен, а при малой потребности может быть благоприятен. Подобные же соображе-

ния следует принимать во внимание при необходимости регулировать подземные воды, оценивая достаточность их емкости с учетом потребности и неравномерности искусственного восполнения подземных вод. Грунтовые воды могут быть отделены от поверхности земли слоем практически непроницаемых (глины и др.) и слабопроницаемых (суглинки, супеси и очень мелкие пески) пород. Поэтому для инфильтрации с поверхности земли (площадной инфильтрации) непроницаемые и слабопроницаемые слои следует снять. При использовании инфильтрационных бассейнов глубина подошвы непроницаемых и слабопроницаемых пород от поверхности земли по экономическим соображениям, как правило, должна быть не больше 5 м. Для бассейнов среднюю скорость инфильтрации необходимо принимать не менее 0,5—1 м/сут и соответственно определять коэффициент фильтрации зоны аэрации (от водоносного слоя до подошвы инфильтрационного бассейна). Целесообразно, чтобы коэффициент был в 2—5 раз больше скорости свободной инфильтрации, т. е. не менее 2—5 м/сут. При этом учитывается возможность некоторой кольтматации грунтов зоны аэрации с уменьшением коэффициента фильтрации.

Однако при указанных выше условиях наличие небольшого по мощности водонепроницаемого или слабопроницаемого слоя у поверхности земли в районе участка искусственного восполнения подземных вод имеет и положительную сторону, предохраняя водоносный горизонт от поверхности загрязнения. При площадной инфильтрации из прудов или путем затопления, например, поймы, т. е. значительных площадей, коэффициент фильтрации в зоне аэрации (и у дна пруда) можно принять ниже минимального, но в каждом конкретном случае это следует решать расчетом. Однако коэффициент фильтрации зоны аэрации или дна прудов, стариц для только что указанных условий должен быть, как правило, не менее 0,1—0,5 м/сут, а в некоторых случаях и больше. При этом нельзя исключать простые дешевые технические и агротехнические методы улучшения инфильтрационных свойств самой верхней (10—20 см) части слоя.

Учитывая гидродинамические и технические условия устройства водозаборов (со скважинами) подземных вод при искусственном их восполнении, желательно иметь коэффициент фильтрации водоносных пород, как правило, не менее 10—20 м/сут и мощность не меньше 10—20 м, т. е. водопроводимость не менее 100—400 м²/сут. Рациональные и экономически выгодные горизонтальные водо-

заборы устраивают и при мощности водоносного слоя 5 м, но при повышенном коэффициенте фильтрации.

Для предохранения от загрязнения водоносных слоев и улучшения качества воды в них целесообразно иметь рыхлые отложения с более высокой удельной площадью поверхности частиц и малыми просветами, т. е. с более высокими сорбционными свойствами. Этому лучше всего удовлетворяют рыхлые породы — мелкозернистые пески и гравийно-галечниковые отложения с мелким заполнителем. Такие породы имеют малый коэффициент фильтрации (до 5 м/сут) и желательны лишь в верхней части водоносного слоя, а для основной его части коэффициент фильтрации целесообразен, как было отмечено, более 10—20 м/сут.

При выборе участков для искусственного восполнения подземных вод мощность зоны аэрации в условиях эксплуатации следует подбирать по возможности не менее 3—5 м, чтобы получить благоприятные условия для улучшения качества воды. В долинах рек рекомендуется выбирать место для инфильтрационных бассейнов на первой надпойменной террасе, а для линейного водозабора из скважин на первой надпойменной террасе или на высокой пойме вдоль ее с подсыпкой, чтобы не заливало во время больших паводков; при этом необходимо соблюдать и прочие требования; в частности расстояние от реки, решая задачу размещения водозаборов подземных вод с учетом всех требований.

Конечно, могут быть и другие оптимальные варианты. При выборе места для отдельных сооружений и их комплекса, включающего предварительную очистку, бассейны и водозаборы подземных вод, резервуары и насосные станции, необходимо проводить анализ не только гидрогеологических условий, но и возможной площади размещения сооружений, рельефа, санитарных условий и пр.

Если при восполнении подземных вод ставится задача создать емкостные запасы, важное значение приобретает наличие достаточно больших мощностей водоносного горизонта и его распространение, что проверяется расчетом с учетом периодических сработок и восполнения емкостных запасов. При восполнении емкостных запасов грунтовых вод без сработки расположение инфильтрационных бассейнов на большом расстоянии от водозаборов не очень благоприятно. Дебиты водозаборов прямо пропорциональны гидравлическим уклонам, а уклоны обратно пропорциональны расстояниям, на которые распространяется понижение уровня воды. Использование емкостных

запасов подземных вод решается для конкретных случаев на основе имеющихся гидрогеологических условий путем технико-экономических расчетов.

Устраивать искусственное восполнение запасов грунтовых вод, приуроченных к трещиноватым породам, при выходе их на поверхность земли для хозяйственно-питьевого водоснабжения обычно нецелесообразно, так как вместо инфильтрации и фильтрации будет происходить инфлюация без улучшения качества воды. Иногда и при таких условиях можно использовать искусственное восполнение подземных вод, чтобы создать их емкостные запасы, но до инфлюации вода должна очищаться. Однако в трещиноватых породах, перекрытых сверху слоем песков мощностью не менее 5—10 м, например в трещиноватых мелах в долине р. Северского Донца, можно и целесообразно применять искусственное восполнение подземных вод.

Искусственное восполнение более глубоких вод, чтобы получить емкостные запасы, осуществляют путем устройства поглощающих скважин, но при этом исходную воду хорошо очищают и, в частности, от мути (до 1—3 мг/л). В этом случае можно использовать водоносные пласты, приуроченные как к рыхлым, так и к трещиноватым породам.

Для расчета поглощающих скважин должны быть известны не только параметры пласта и граничные условия, но и данные опытов по поглощению, приемистости скважин и ее изменчивости во времени в конкретных условиях. Для оценки емкостных запасов требуются достаточно надежные основные данные о параметрах водоносного пласта и граничных условиях.

Искусственное восполнение с устройством поглощающих скважин стоит дороже, чем способ с поверхностной инфильтрацией. Поэтому для искусственного восполнения грунтовых вод такой способ применяется редко.

Источником искусственного восполнения подземных вод могут быть подземные же воды другого водоносного горизонта (СССР, Аркагалинский артезианский бассейн) или того же водоносного горизонта, но с другого несколько удаленного участка (СССР, долина р. Баханчи, подмерзлотные воды в аллювиальных отложениях). При использовании подземных вод в качестве источника искусственного восполнения, очевидно, должны быть исследованы гидрогеологические условия такого источника.

В условиях многолетней мерзлоты и вообще в условиях холодного климата при оценке искусственного восполне-

ния подземных вод существенное значение имеют тепловые расчеты, для которых необходимо получить дополнительные соответствующие теплофизические параметры как водоносных, так и окружающих пород (коэффициенты теплопроводности и теплоемкости с климатическими показателями). По экономическим показателям целесообразно и выгодно в ряде случаев искусственное восполнение даже в условиях многолетней мерзлоты.

При оценке гидрогеологических условий следует анализировать также состав подземных вод в водоносном горизонте как намечаемом к искусственному питанию, так и служащем в качестве источника восполнения. При этом необходимо иметь в виду последствия смешивания воды источника восполнения с водой на участке восполнения.

При искусственном восполнении водами, богатыми кислородом, следует тщательно взвесить последствия окисления закисных соединений в естественных подземных водах и возможность образования осадка, что влечет за собой коагуляцию. Кроме того, необходимо учесть влияние пород в водоносном горизонте и над водоносным горизонтом, в особенности при изменении условий при эксплуатации, и влияние этих пород на состав подземной воды при восполнении. Изменения состава подземных вод при эксплуатации, например увеличение содержания железа в воде, выпадение осадков из воды и коагуляция пород водоносного горизонта, а также закупоривание фильтра скважин, описаны автором.

Неблагоприятными условиями для искусственного восполнения грунтовых вод являются: наличие над ними глинистых и вообще слабопроницаемых пород с коэффициентом фильтрации менее 2 м/сут и при мощности их более 5 м; близкий к поверхности земли уровень грунтовых вод — менее 2—3 м; большая глубина залегания водоносного горизонта (более 20—30 м), что вызывает дополнительный расход энергии на подъем воды; водоносные горизонты с естественными солеными или другого неблагоприятного состава подземными водами, например загрязненными химическими удобрениями, сельскохозяйственными ядохимикатами, ПАВ, а также промышленными и фекально-хозяйственными сточными водами.

Однако и при некоторых вышеуказанных неблагоприятных условиях иногда возможно искусственное восполнение подземных вод, например, для вытеснения неблагоприятных по составу подземных соленых вод при искусственном их восполнении.

На участках действующих водозаборов или эксплуатируемых сооружениях для искусственного восполнения анализируются гидрогеологические материалы и ведутся наблюдения за режимом подземных вод, что особенно важно в условиях эксплуатации. Следует учесть, что при искусственном восполнении в водозаборы может поступать не только искусственно восполняемая подземная вода, но и естественная при измененном режиме под влиянием эксплуатации.

3. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И РЕЛЬЕФ

В качестве источника искусственного восполнения наиболее часто используют поверхностные воды — реки, водохранилища на реках, озера. В одних местах имеется развитая сеть рек со значительными расходами, в других — речная сеть развита слабо, и при этом лишь отдельные реки характеризуются значительным расходом. Для оценки расхода реки, уровня воды и ее качества необходимо знать многолетний режим поверхностных вод и в течение года.

На большей части территории СССР наивысшие расходы рек приходятся на весенний паводок, а в Средней Азии паводки, например на реках Амударье и Сырдарье, бывают летом при таянии ледников в горах. Меженный расход в одних реках может удовлетворять потребность в воде, в других он становится весьма незначительным, и на некоторых поверхностный сток в межень даже прекращается. Есть реки, в которых паводок проходит в несколько дней или десятков дней, а затем поверхностный сток прекращается на несколько лет (до 10 лет и более). Положение уровней воды тесно связано с расходом. Для оценки возможности отбора воды из озер и водохранилищ необходимо знать их вместимость, глубины и уровни воды, а также их изменение. Кроме того, анализируется поступление воды из различных источников и периодическое изменение ее расхода.

Качество воды в реках и озерах меняется по годам и особенно по сезонам. Как правило, в реках во время паводка вода мутная со значительной концентрацией взвешенных частиц — до 1—10 г/л и более; при этом ухудшаются и другие показатели качества воды. Мутность определяется обычно в миллиграммах на 1 л. Кроме того, для анализа и расчета работы сооружений предварительной очистки и инфильтрационных сооружений, а также для оценки такой очистки целесообразно вместе с харак-

терными показателями расходов, снятых с гидрографа, приводить данные о механическом составе взвешенных частиц в воде в виде табл. 1 или полулогарифмических графиков.

Таблица 1. Механический состав взвешенных частиц в воде

Диаметр фракций, мм	Концентрация, %	Диаметр фракций, мм	Концентрация, %
Более 1	28	0,05—0,01	20
0,5—1	4	Менее 0,01	8
0,25—0,5	5		
0,1—0,25	15	$d_{10} (d_z)$	0,014
0,05—0,1	20	d_{60}	0,2

Величина мутности воды связана почти функционально со скоростью движения воды и ее расходом (для конкретных условий). Поэтому, пользуясь гидрографом, можно и нужно составить графики изменения мутности во времени. Необходимо также учесть, что величина мутности в сечении реки изменяется в разных точках и в особенности по глубине. Некоторые реки бывают сильно загрязнены органическими и токсичными (включая органические) веществами, бактериями и другими организмами. Многие озера (в особенности проточные) и водохранилища являются часто более благоприятными по качеству воды источником искусственного восполнения подземных вод. В водохранилищах мутность воды в среднем значительно меньше, чем в реках, и при этом колебания ее во времени незначительные.

Например, в оз. Балтэзерс мутность в среднем составляет 5 мг/л, редко увеличиваясь до 10 мг/л.

Следует учесть, что в озерах и водохранилищах, в особенности неглубоких и хорошо прогреваемых, в летнее время может интенсивно развиваться планктон, в частности сине-зеленые водоросли (последние при отмирании придают воде плохой вкус). Если не предусмотреть предварительной водоподготовки, то планктон засаривает инфильтрационные бассейны. Так, на небольшой системе ИВПВ в октябре 1967 г. из-за сильного развития сине-зеленых водорослей в водохранилище расход инфильтрационных бассейнов уменьшился в 7 раз (В. В. Янчев и др.).

Растворенные в воде коллоидные органические вещества влияют на цветность, окисляемость, запахи, привкусы и на показатель по кислороду. Наибольшая цветность воды отмечается для водоемов, сообщающихся с болотами

и заболоченными лесами, а наименьшая — в реках полупустынных и горных районов.

Одним из важнейших органических компонентов, обуславливающих цветность, является гумус. В соединениях гумуса значительный процент занимают фульвокислоты (в р. Москве 32—47%, в р. Припяти до 88—97% в зависимости от времени года). Истинно растворимые фульвокислоты слабо влияют на окраску воды, а гуминовые кислоты придают воде темный оттенок.

О содержании органических веществ в воде часто судят по ее окисляемости, и в частности перманганатной; однако последняя дает несколько приближенное суждение о количестве органики в воде. Более полным показателем содержания органических веществ является бихроматная окисляемость. Отношение ее к перманганатной окисляемости для крупных рек европейской части СССР составляет около 2—3.

Анализ изменчивости расхода рек, баланса озер и качества воды в них, особенно по обеспеченности, делается в основном по методике, принятой в гидрологии, а при недостатке или недостаточной надежности исходных данных с учетом дополнительных гидрологических наблюдений и их анализа. Анализ гидрологических наблюдений включает специфические требования к проектированию искусственного восполнения подземных вод. В частности, по многолетнему гидрографу расхода реки определяются интервалы времени с суммарными и дифференцированными выделяемыми периодами недостаточных расходов для искусственного восполнения. Кроме того, на перспективу определяются (анализируются показатели по теории вероятности) неблагоприятные периоды по мутности и другим показателям, когда необходимо будет исключить подачу воды или провести предварительную водоподготовку для искусственного восполнения подземных вод. Повышение мутности и ухудшение качества воды в реке обычно наблюдаются в паводок, но пики расходов воды и твердого стока (с качеством воды) могут не совпадать — разница до 10 дней и более. При недостатке расхода рек для искусственного восполнения в интервалах отдельных периодов необходимо делать детальный анализ изменчивости и обеспеченности таких расходов. При анализе следует учитывать возможность использования, например, отдельных паводков в периоды меженного недостаточного расхода.

В настоящее время на многих реках и озерах работают наблюдательные гидрологические станции и посты, данные

которых в обработанном виде публикуются в гидрологических ежегодниках и хранятся в фондах. Кроме того, имеются монографические описания по отдельным районам. В первую очередь следует оценить возможность и целесообразность использования озер и водохранилищ. Если ресурсы озера (водохранилища) недостаточны для получения необходимого расхода воды, то анализируются условия искусственной подачи поверхностных вод в озеро. Такой вариант оказался приемлемым при анализе искусственного восполнения подземных вод для водоснабжения одного из городов в СССР.

При решении вопроса использования поверхностных вод для искусственного восполнения подземных вод следует учитывать не только потребности водоснабжения, которые удовлетворяются в первую очередь, но также и другие потребности. Расход рек не всегда оказывается достаточным для непрерывного искусственного восполнения подземных вод, поэтому принимают во внимание сезонную и многолетнюю изменчивость расхода рек и качества воды, возможность использования регулирующих способности водоносных горизонтов и гидротехнических сооружений. В этом случае анализируют технические возможности существующих и проектируемых гидротехнических сооружений. При недостаточности данных об изменении расходов, уровней и качества поверхностных вод проводят дополнительные гидрометрические наблюдения, продолжительность которых обычно относительно небольшая — не больше 1—3 лет. Эти короткие наблюдения сопоставляют с длинным рядом наблюдений, а также с метеорологическими данными и делают необходимый гидрологический анализ, расширяя период наблюдений по теоретическим связям для исследуемых элементов. В гидрологических обработках минимальные расходы рек даются обычно в виде среднемесячных и экстремальных. Если по расходу они превышают потребность, то дальнейший анализ собственно для восполнения запасов подземных вод обычно не нужен. Данные об уровнях рек и озер обычно получаются достаточные.

Если минимальные экстремальные расходы рек при необходимой обеспеченности не удовлетворяют потребность, то делается специальный анализ для определения опасного (расчетного) суммарного недостатка в воде не только за большие меженные периоды, но и за короткие интервалы времени. Расчеты указанных периодов с суммарным недостатком воды выполняют с учетом сработок и восполнения емкостных запасов подземных вод. При

анализе изменчивости качества воды следует учитывать отставание изменчивости отдельных ее показателей от изменения величины расхода. Сопоставление качества воды и расходов реки с соответствующим анализом позволяет восстановить картину изменчивости такого качества воды за длительный период.

Пример 1. Рассмотрим анализ изменчивости минимальных расходов реки при недостатке их в отдельные периоды года. Сначала изложим методику расчета. По многолетнему гидрографу подсчитаем суммарные расходы за меженные (условно) периоды каждого года, определяя их продолжительность по общему фону расходов не меньше пропускной способности водозаборов подземных вод (потребности) с

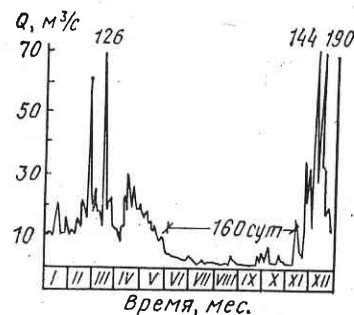


Рис. 4. Гидрограф реки

коэффициентом $1/\eta$, где η — коэффициент полезного использования бассейнов при искусственном восполнении, часто равный примерно 0,5—0,8*. Для интервалов выделенных меженных периодов определяем в течение года потребности с коэффициентом $1/\eta$ и расход реки заданной обеспеченности. Далее за каждый год для выделенных меженных периодов проверяем достаточность расхода рек для ИВПВ. При оценке суммарных расходов за меженные периоды учитываем расходы паводков, конечно, при надлежащем качестве воды. Если меженный расход реки при увеличении мутности нельзя полностью использовать для искусственного восполнения, то берем только часть этого расхода. Затем для иллюстрации такого расчета сделаем для одного объекта конкретный анализ в течение года. Пусть потребность в воде составляет 1,8 м³/с. Для предварительных расчетов методом подбора примем пропускную способность водозаборов подземных вод 1,8 м³/с. Коэффициент η возьмем 0,9 (очень хороший). Тогда необходимый фон для меженного расхода получим 2 м³/с. На рис. 4 показан гидрограф расхода реки за год, выбранный для анализа. На этом графике при расходе 3 м³/с и меньше период длится 160 дней, а с расходом меньше 2 м³/с — с 7 июля по 11 ноября, т. е. 127 дней. В течение последнего периода было несколько небольших паводков с водой удовлетворительного качества, кроме одного продолжительностью 3 сут, когда воду нельзя было использовать для искусственного восполнения подземных вод. Продолжительность всех паводков была 26 сут; из них в течение 23 сут с водой пригодного качества и с потребным расходом 2 м³/с для искусственного восполнения. Суммарная подача за 101 сут составляет в среднем 1,26 м³/с. Таким образом, за 101 сут вместе с одним трехдневным паводком требуется регулирующая (запасная) емкость 7,5 млн. м³ воды; это недостаток в воде. При указанных выше условиях на восстановление сработанных запасов с расходом рек 3 м³/с и больше требуется $\approx 81,8$ сут. Гидрологические условия это позволяют. Из анализа допустимого качества воды (анализ не приводится) в остальное

* Уточняется по совместному расчету инфильтрационных сооружений и водозаборов подземных вод.

время имеется 105 сут, когда расход реки больше 3 м³/с, а качество воды пригодно для искусственного восполнения подземных вод.

Регулирование емкостных запасов должно подтверждаться гидрогеологическими расчетами, а также расчетами сооружений искусственного восполнения подземных вод. Для проектирования сооружений искусственного восполнения подземных вод, кроме данных по количеству и качеству воды и их изменчивости, включая температуру, необходимо иметь данные о толщине льда в зимний период, шуге и донном льде.

Обычно вниз по течению реки расход ее увеличиваетс. Но бывают случаи, когда минимальный расход реки ниже по течению уменьшается в результате отбора воды или по естественным условиям. Например, по р. Сочи, ниже Пластунских ворот на 2—3 км после выхода реки из теснины на широкую первую надпойменную террасу, расход уменьшается минимум в 1,5—2 раза при обеспеченности 80—95%. Это для конкретных условий может быть весьма существенным.

Гидрологические исследования должны сопровождаться анализом рационального выбора метода для забора поверхностных вод и, в частности, по рекомендациям справочника проектировщика [32] разд. 1, гл. 2 и разд. 2 и гл. 11.

По категориям надежности подачи воды системам водоснабжения расчетную обеспеченность суточных расходов и уровней поверхностных вод следует принимать по табл. 2.

Таблица 2. Расчетная обеспеченность суточных расходов и уровней поверхностных вод

Категория надежности	С числом жителей	Снижение подачи воды от расчетной потребности		Расчетная обеспеченность, %		
				уровней		минимальных расходов
		%	продолжительность	максимального	минимального	
I	>50000	30	1—3 сут	1	97	95
II	<50000	30	1 мес	2	95	90
		100	3—5 ч			
III	<500	30	1 мес	3	90	85
		100	1 сут			

Категории надежности для промышленных предприятий приведены в работе [32].

Рельеф местности имеет существенное значение для схемы ИВПВ. Например, в долине р. Арагви первая над-

пойменная терраса (довольно широкая) вдоль долины имеет уклон около 0,01; это позволяет всю систему ИВПВ сделать самотечной от реки в отстойник, далее в инфильтрационные бассейны и по горизонтальным дренажным трубам до сборного колодца. При таких условиях заметно снижается себестоимость воды (до 30% и более).

При размещении инфильтрационных и водозаборных сооружений необходим генеральный план в районе участка системы ИВПВ в масштабе 1:10 000—1:2000 с горизонталями поверхности земли через 0,5—1 м, гидроизогипсами (или гидроизопьезами) при минимальном и максимальном уровнях подземных вод, с отметками минимального и максимального уровней поверхностных вод, а также с показанием расположения поверхностных вод, леса, всех зданий и сооружений. Такие требования к показателям на плане могут уточняться по материалам местных условий. Для проектирования отдельных сооружений ИВПВ (кроме скважин) необходимы планы площадок в масштабе 1:500—1:2000 с горизонталями через 0,5—1 м.

Глава III. СХЕМЫ СИСТЕМ ИВПВ И ИХ ВЫБОР

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Как отмечалось ранее, системы искусственного восполнения подземных вод подразделяются на три основных типа — открытые, в основном с инфильтрационными бассейнами; закрытые, в основном с инфильтрационными скважинами, и простые с поверхностной фильтрацией, с использованием естественных и нарушенных условий, главным образом гидрогеологических и гидрологических.

В открытой безнапорной системе ИВПВ (I тип), существенное значение имеет поверхностная инфильтрация со специальными сооружениями — инфильтрационными бассейнами, которые выполняют важную роль при улучшении качества воды. Для закрытых систем ИВПВ (II тип) инфильтрация происходит через поглощающие скважины (иногда колодцы и др.), куда должна подаваться уже чистая вода. В III типе ИВПВ при поверхностной фильтрации вместо бассейнов используют естественные понижения в рельефе и старицы, а также участки пойменных и низких надпойменных аллювиальных террас.

В состав I и II типов систем ИВПВ могут входить водозаборы из поверхностных и подземных вод как ис-

точника ИВПВ, насосные станции, сооружения для предварительного и последующего улучшения качества воды, резервуары, инфильтрационные сооружения (бассейны, скважины и др.), водозаборы из подземных вод для получения искусственно восполняемой подземной воды и водоводы. В III типе систем ИВПВ все проще: вода поступает на участки для инфильтрации обычно самотеком и реже подкачивается; предварительного улучшения качества исходной воды обычно не делается. В соответствующих условиях III тип ИВПВ выгоден и начал применяться (в СССР); такой способ распространен и в США. В Западной Европе, где реки загрязнены, III тип ИВПВ почти не применяется. Самостоятельно выделяются системы ИВПВ с травянистыми покрытиями. Такие системы содержат в себе элементы ИВПВ I и III типов.

Следует также не забывать, что важнейшей частью систем ИВПВ является водоносный горизонт, куда поступает вода для восполнения и где также происходит улучшение качества воды. Системы ИВПВ могут быть непрерывно действующими при одновременном восполнении и отборе из них воды. В этом случае, в особенности при безнапорной фильтрации, основная задача систем ИВПВ заключается в дешевом улучшении качества поверхностных вод. Есть системы ИВПВ с периодическим восполнением в течение года и даже один раз в течение нескольких лет, в связи с режимом расхода поверхностных вод. В этом случае одним из важнейших показателей систем ИВПВ является получение емкостных запасов, аналогично поверхностным водохранилищам. Затем, например, для орошения вода из систем ИВПВ получается в течение не всего года, т. е. вода используется периодически. Между указанными выше системами по срокам восполнения и отбора есть промежуточные системы, которые работают с прекращением восполнения в периоды плохого качества поверхностных вод или во время очистки инфильтрационных бассейнов от осадка (пленки), а также в связи с ремонтом в системе ИВПВ.

Ниже более подробно рассмотрим отдельно системы инженерного ИВПВ I и II типов, а также простые системы ИВПВ III типа с использованием для поверхностной инфильтрации естественных условий.

2. СИСТЕМЫ I ТИПА (ОТКРЫТОГО)

В инженерных системах ИВПВ I типа чаще применяют для инфильтрации бассейны, реже инфильтрационные каналы. Одна из схем ИВПВ с инфильтрационными бас-

сейнами (см. рис. 1) предусматривает предварительное улучшение качества воды, чтобы создать благоприятные условия для работы инфильтрационных бассейнов. Чаще всего для этого требуется снижение мутности воды и особенно для отдельных периодов — паводков на реках. Однако в некоторых случаях необходимо более фундаментальное предварительное улучшение качества поверхностных вод.

На схеме (см. рис. 1) принято по одному ряду инфильтрационных бассейнов и водозаборных скважин. Применяют также схемы из двух и трех рядов бассейнов и скважин; при этом параллельное линейное их расположение в зависимости от конкретных условий может быть заменено и другим расположением бассейнов и скважин. На указанной схеме вода из скважин откачивается погружными электронасосами и поступает в резервуары или в несколько резервуаров для регулирования работы систем ИВПВ. По этой схеме предусматривается последующее улучшение качества воды, когда качество воды, поступающей из водозабора подземных вод, ниже кондиционных требований. Чаще всего для последующего улучшения качества воды применяют хлорирование, если бактериальные показатели воды несколько хуже требований ГОСТ 2874—73. Однако и при качестве воды, соответствующем требованиям ГОСТ, хлорирование применяют как профилактическое мероприятие, предупреждая возможность ухудшения бактериального состава при подаче по водоводам и разводящей сети к потребителю. Однако хлорирование может вести и к ухудшению качества воды, например, органолептических показателей, в частности при наличии закисного железа в воде, подаваемой из водозабора.

Предварительное улучшение качества воды до инфильтрационных бассейнов делается не всегда. Например, при малой мутности воды, когда источником ИВПВ являются озера и водохранилища или при выключении подачи воды в инфильтрационные бассейны при высокой мутности воды в период паводков и при других показателях качества воды. Если поверхностная вода хорошо улучшается в инфильтрационном бассейне и водоносном горизонте, то предварительное улучшение качества воды не нужно. По такой схеме непрерывно в течение года работает система ИВПВ в районе Прибалтики, источником которой является озеро.

Вместо погружных электронасосов для получения воды из водозаборов со скважинами применяют также сифоны

и всасывающие линии. По схеме водозабора из скважины с сифонами работает одна из систем ИВПВ в Прибалтике. Последнее время часть сифонных линий подсоединена к всасывающим горизонтальным центробежным электронасосам, перед которыми установлен воздушный колпак (с отсасыванием воздуха вакуум-насосом). Таким образом, получается рациональная схема сифона с всасывающим насосом. В этом случае не нужен резервуар или сборный колодец между водозабором и насосной станцией II подъема, а вода в системе подается насосной станцией сразу в водовод к потребителю, и регулирование подачи воды в системе ИВПВ на самом участке водозабора исключается.

Иногда инфильтрационные бассейны располагают как бы цепочкой: вода подается сначала в первый инфильтрационный бассейн, из него — во второй и т. д. При этом первый инфильтрационный бассейн служит, по существу, и отстойником. По такой схеме работают в настоящее время системы ИВПВ в долине р. Сочи и с некоторыми изменениями в долине р. Чирчик. Недостатком этой схемы является неравномерное образование фильтрующей пленки на дне бассейнов, что влечет за собой разную скорость фильтрации в бассейнах и, самое важное, неравномерное улучшение качества воды при фильтрации через пленки с отличающимися фильтрационными свойствами. На некоторых объектах при такой схеме ИВПВ с расположением инфильтрационных бассейнов «цепочкой» наблюдается неравномерное качество воды и в особенности по бактериальным показателям в различных скважинах водозабора, получающих воду из бассейнов. Недостатком вышеприведенной схемы расположения бассейнов является также необходимость выключения всей системы ИВПВ для чистки бассейнов от осадков (пленки). Такую схему «цепочкой», как правило, рекомендовать нельзя.

Развитием схемы расположения бассейнов «цепочкой» является замена их инфильтрационным каналом. ИВПВ с инфильтрацией из каналов применено, например, в районе Прибалтики, где водозабор из линейного ряда скважин расположен между двумя инфильтрационными каналами. При таком типе фильтрационного сооружения неравномерность выпадения осадков по длине канала сохраняется; осадок (пленка) легко удаляется промывкой. Однако маневренность в системе ИВПВ с инфильтрационными каналами по сравнению с бассейнами хуже.

При мощности водоносного слоя до 6—8 м вместо скважин в ряде случаев целесообразно применять гори-

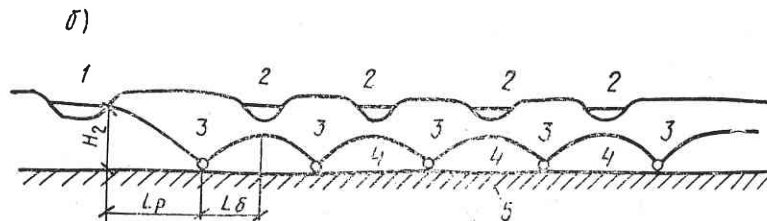
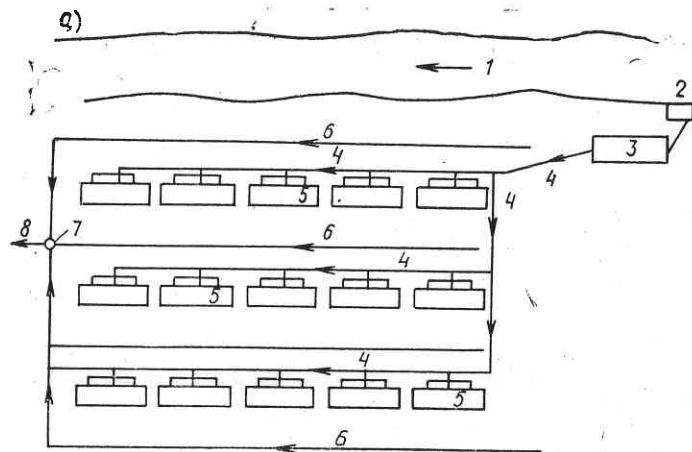


Рис. 5. Схема самотечной системы ИВПВ открытого I типа из поверхностных вод с ковшом-отстойником, инфильтрационными бассейнами и горизонтальными водозаборами

а — план: 1 — река; 2 — водозабор из реки; 3 — отстойник; 4 — водоводы для подачи воды в инфильтрационные бассейны; 5 — инфильтрационные бассейны; 6 — горизонтальные водозаборы (дренажные трубы); 7 — сборный колодец с хлорированием; 8 — водовод к потребителю
б — разрез: 1 — река; 2 — инфильтрационные бассейны; 3 — дренажные трубы; 4 — водоносные породы; 5 — водонепроницаемые породы

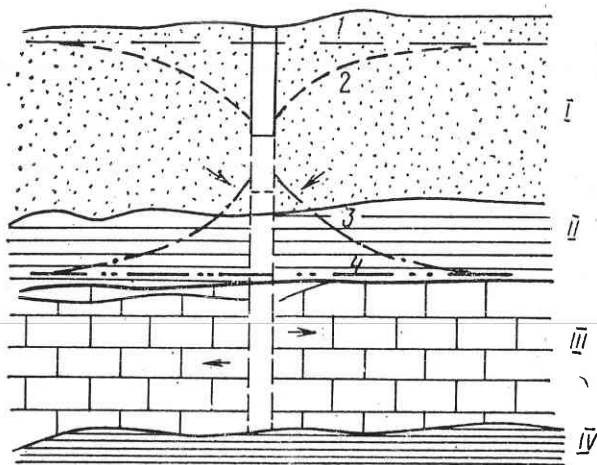


Рис. 6. Схема дренажно-инфильтрационной скважины
I — верхний водоносный горизонт в песчано-гравийных отложениях; II — водоупорные глины; III — нижний напорный водоносный горизонт в трещиноватых песчаниках; IV — водоупорные глинистые сланцы; 1 — статический и 2 — динамический уровни воды в верхнем водоносном горизонте; 3 и 4 — соответственно динамический и статический уровни в нижнем напорном водоносном горизонте

горизонтальный водозабор из дренажных труб. Такой водозабор подает воду самотеком. При достаточном продольном уклоне долины, как отмечено выше, и вся система ИВПВ может быть самотечной. На рис. 5 и 6 показана в плане и разрезе схема самотечной системы ИВПВ с горизонтальными водозаборами и инфильтрационными бассейнами. Для предварительного осветления воды предусмотрен отстойник-ковш. По такой схеме работает система ИВПВ в долине р. Арагви с несколькими рядами инфильтрационных бассейнов и горизонтальных водозаборов. В этой схеме насосная станция отсутствует. Нет и регулирующего резервуара. Хотя последний в ряде случаев может быть рационален, например после сборной камеры перед насосной станцией для регулирования подачи воды потребителю.

3. СИСТЕМЫ II ТИПА (ЗАКРЫТОГО)

Инженерные системы ИВПВ закрытого типа применяют, когда подошва водонепроницаемых или слабопроницаемых пород залегает на глубине более 5 м от поверхности земли. Для таких систем, чтобы пополнить подземные воды, сооружают обычно инфильтрационные скважины. Система закрытого типа ИВПВ чаще используется для восполнения напорных подземных вод. Для получения подземной воды из указанных систем ИВПВ эксплуатируют водозаборы подземных вод из скважин.

Схема одного из вариантов ИВПВ закрытого типа показана на рис. 2. Важной особенностью такой системы является, как правило, предварительное улучшение качества воды, которая в основном должна соответствовать кондиционным требованиям, включая мутность не более 1—3 мг/л. Это высокие требования для закачиваемой воды, но они обычно необходимы. Дело в том, что инфильтрационные скважины, в особенности при водоносных песках, наиболее подвержены кольматации на участке поступления в водоносный горизонт. В связи с этим необходимы дополнительные требования к исходной воде, чтобы скважины не уменьшали дебит при эксплуатации или как можно меньше его уменьшали. Затем закачиваемая вода должна быть совместима с подземной водой, чтобы не выпадало осадка; последнее относится ко всем типам ИВПВ. Кроме того, в закачиваемой в скважины воде не должно быть пузырьков воздуха, иначе может уменьшаться приемистость инфильтрационных скважин. И, наконец, кроме требований к бактериологическому

составу, необходимо делать биологический анализ на содержание бактерий и микроскопических водорослей, которые могут вызвать кольматацию в инфильтрационной скважине и в восполняемом водоносном горизонте.

На рис. 2 система напорного ИВПВ состоит из двух линейных рядов скважин, которые попеременно могут быть инфильтрационными и водозаборными, что облегчает борьбу с кольматацией и помогает восстановлению приемистости скважин. В такой системе предусмотрена предварительная водоподготовка.

В некоторых случаях при наличии источника с достаточно чистой водой предварительную водоподготовку ограничивают. Например, для одного объекта в Прибалтике предварительная водоподготовка заканчивается улучшением качества воды на сверхскоростных фильтрах Никифорова и обеззараживанием. На одном из крупных районных ИВПВ на Ближнем Востоке вода из озера подается без предварительной подготовки в инфильтрационные скважины при мутности воды 2 (в ед. Джексона), коли-индекс менее 20 и водорослей 150—800 клеток/л. Вода из указанной системы ИВПВ откачивается скважинами для водоснабжения и в основном для орошения. Следует отметить там значительное снижение приемистости скважин за период закачки. Эта приемистость восстанавливается (не полностью) в период между нагнетаниями и, в частности, откачкой. По санитарным нормам для такой системы ИВПВ в условиях СССР требуется предварительное улучшение, минимум по бактериальным показателям. Кроме того, необходимо бороться и с загрязнением водорослями.

В зависимости от гидрогеологических и других природных условий схемы напорного ИВПВ могут варьироваться. Например, в некоторых случаях для подпитывания напорного водоносного горизонта из вышележащего горизонта применяют дренажно-инфильтрационные скважины и, например, по схеме, приведенной на рис. 6.

4. ПРОСТЫЕ СИСТЕМЫ III ТИПА (ОТКРЫТОГО)

Простые системы III типа также относятся к открытым и применяются с использованием естественных и нарушенных условий инфильтрации и их улучшения. В таких системах специальное предварительное улучшение качества воды не применяется. Гидрологические и гидрогеологические условия разнообразны как и условия инфильтрации поверхностных вод в подземные, которые могут изменять-

ся и улучшаться в результате простых мероприятий, а также устройства гидротехнических сооружений, не предназначенных для ИВПВ, но улучшающих (иногда создающих) искусственную инфильтрацию поверхностных вод в подземные. Задача заключается в том, чтобы использовать природные условия или существующие гидротехнические сооружения. При этом предполагается проведение простейших мероприятий для улучшения инфильтрации с получением воды кондиционного качества. При таких условиях вода рек, озер, водохранилищ фильтруется без всяких дополнительных сооружений через берега и дно водоемов и даже через открытую поверхность земли, в частности при пусках на нижний бьеф плотины.

В этом случае отпадает необходимость устраивать инфильтрационные бассейны и каналы для I типа ИВПВ и поглощающие скважины для II типа. Кроме того, не требуется предварительная водоподготовка, как правило, применяемая для II типа ИВПВ и нередко для I типа. Однако в рассматриваемых системах ИВПВ III типа может применяться последующее улучшение качества воды и почти всегда ее хлорирование. В III типе имеются водозаборы подземных вод, расчет которых оказывается сложнее, так как питание подземных вод часто происходит неравномерно и в связи с этим водоподъемники работают при неустановившемся движении подземных вод и нередко при значительных колебаниях динамического уровня воды. Однако это требует намного меньше капитальных затрат, снижается себестоимость воды по сравнению с эксплуатацией систем ИВПВ I типа.

Представим некоторые простейшие мероприятия, необходимые для улучшения питания подземных вод системы ИВПВ III типа:

при достаточной емкости водоносного горизонта в условиях эксплуатации при ИВПВ можно увеличить его питание, а следовательно, эксплуатационные запасы, повысив коэффициент инфильтрации атмосферных осадков. Например, можно устроить поперек уклона местности небольшие валики, лесонасаждение и, в частности, лесные полосы;

в нешироких речных долинах с малой емкостью водоносного горизонта возможен вариант проектирования продольного (вдоль реки) рассредоточенного водозабора для увеличения регулирующей емкости;

при мощности более 20—30 м водоносного горизонта и достаточно широкой долине, недостаточном расходе реки в отдельные периоды и недостаточной резервной емкости в естественных условиях возможен вариант снижения уров-

ней подземных вод при их эксплуатации, чтобы создать необходимую регулируемую емкость для периодического восполнения запасов подземных вод во время паводков реки путем инфильтрации поверхностных вод в водоносный горизонт;

при эксплуатации береговых инфильтрационных водозаборов русло реки постепенно заиляется; в связи с этим ухудшается питание подземных вод из реки. Для восстановления фильтрационных свойств русла реки целесообразно произвести рыхление верхней части закольматированного слоя;

для поверхностного подпитывания грунтовых вод можно использовать естественно или искусственно заливаемые старицы и понижения в рельефе на речных террасах, в особенности пойменной;

при гидротехнических сооружениях часто наблюдается усиление фильтрации в водоносные горизонты из каналов и водохранилищ. При устройстве некоторых водохранилищных плотин для оросительных целей иногда предусматривают возможность фильтрации под плотиной для подпитывания водоносных горизонтов в аллювиальных отложениях;

эксплуатация подземных вод и их интенсификация благоприятны в конусах выноса в особенности при наличии в них аккумулярующих емкостей для создания запасов подземных вод в периоды недостаточного питания поверхностными водами или даже их отсутствия.

Приведенные примеры говорят о возможности увеличить эксплуатационные запасы подземных вод, расход водозаборов путем простых мероприятий. Конечно, примеры не исчерпывают разнообразие природных условий и способов улучшения подпитывания водоносных горизонтов.

5. ТРАВЯНЫЕ БАСЕЙНЫ

Как отмечено выше, при искусственном восполнении подземных вод используются луга; в естественных понижениях они заливаются поверхностной водой, которая фильтруется через дерн и почву и при этом значительно улучшается по качеству. При необходимости площадки лугов огораживают валиками. Иногда устраивают неглубокие травяные бассейны, на дно которых укладывают дерн.

Во всех простых системах ИВПВ отсутствуют сооружения по предварительной водоподготовке, но после получения подземных вод из таких систем может быть последующее улучшение качества воды, а хлорирование, как правило,

обязательно. Гидрогеологические, гидрологические и технические условия систем ИВПВ с травяными бассейнами разнообразны. Следует также отметить, что сама эксплуатация подземных вод вызывает снижение их уровней и тем самым повышает возможности дополнительных притоков поверхностных вод в подземные.

6. ВЫБОР СИСТЕМЫ ИВПВ

Для конкретных объектов проектирования ИВПВ детализация схемы, размеры и конструкции сооружений уточняются и проверяются расчетами с учетом указанных климатических, гидрогеологических, гидрологических, санитарных, экономических и прочих условий, включая величину потребности в воде, рельеф. Расход, а также качество исходной воды (мутность, бактериологические показатели, наличие водорослей, содержание токсичных веществ и т. д.) существенно влияют на выбор схемы систем ИВПВ. Наиболее дорогим чаще является закрытый II тип ИВПВ, а самым дешевым обычно III тип ИВПВ. Предварительная водоподготовка, если требуется существенное улучшение качества воды (для закрытых систем ИВПВ, как правило, обязательная), является также дорогой, составляя, примерно, 20—50% себестоимости ИВПВ. Предварительная же водоподготовка в открытых отстойниках не дорогая: по капиталовложениям — около 6—7%, а по себестоимости воды — порядка 2%.

Для I типа ИВПВ с поверхностной фильтрацией необходимо стремиться перенести в основном улучшение качества воды на инфильтрационные бассейны (каналы) и частично на водоносный горизонт. Для этого часто выгодно небольшое предварительное улучшение качества воды в открытых отстойниках, где снижается мутность и улучшаются бактериальные показатели. Когда в период паводка на горных речках бывает высокая мутность, а в системе ИВПВ нельзя или не рационально создавать регулируемую вместимость и водозаборы в такой системе нельзя отключать, следовало бы проанализировать целесообразность предварительного осаждения крупных взвешенных веществ в песколовках. Эта проблема для систем ИВПВ совсем не разработана.

Подробные указания, связанные с работой и расчетом отдельных элементов систем ИВПВ, рассмотрены ниже.

Глава IV. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ИВПВ

1. ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование систем ИВПВ является специфическим, но в то же время включается, как составная часть проектирования водоснабжения в целом. При проектировании ИВПВ необходимо учитывать его взаимосвязь с системой водоснабжения в целом. ИВПВ следует проектировать с учетом комплексного использования водных ресурсов, схем водоснабжения и канализации, разработанных в составе генеральных планов района. Проектирование систем ИВПВ должно основываться на анализе природных, технических и санитарных условий источников водоснабжения.

Потребный расход систем ИВПВ определяется в общем проекте водоснабжения с учетом природных, санитарных, технических и экономических показателей, а также имеющихся водозаборных сооружений. При оценке потребного расхода системы ИВПВ следует учитывать коэффициент использования исходной воды в системе ИВПВ, в особенности КПД инфильтрационных бассейнов η , а также потери при промывке сооружений, предварительном и последующем улучшении качества воды. Полезный расход системы ИВПВ определяется с перспективой на 25 лет и более. Затем при определении расхода систем ИВПВ на отдельный период учитывают расчетные сроки строительства, а в случае необходимости и для пускового комплекса системы. Кроме того, целесообразно иметь соображения и на отдаленную перспективу (50 лет и более) как по возможному расходу систем ИВПВ, так и по условиям размещения сооружений такой системы, так как последнее может лимитировать ее расход. Последовательность проектирования систем ИВПВ позволяет в дальнейшем вносить уточнения и легче внедрять рационализацию по мере развития строительства и эксплуатации указанных систем по очередям их строительства. Это определяется опытом эксплуатации систем ИВПВ и, в частности, возможными изменениями со временем природных и технических условий. Для проектирования систем ИВПВ следует иметь гидрологические данные по источнику восполнения, гидрогеологические по восполняемому водоносному горизонту, топографические планы, а также оценку санитарных условий.

Расчеты систем ИВПВ обязательно увязывают с этапами изысканий, а также потребными расходами согласно проекту водоснабжения объекта. Обоснованием для проек-

тирования систем ИВПВ является задание заказчика на проектирование водоснабжения, данные изысканий и сравнительный анализ выбора вариантов источника водоснабжения.

2. СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИХ СВЯЗЬ С ИЗЫСКАНИЯМИ

Проектирование систем ИВПВ для водоснабжения выполняют с учетом предпроектных работ, схемы использования водных ресурсов отдельного речного бассейна, генерального плана развития городов и промышленных зон, а также перспектив водоснабжения городов и промышленных предприятий. Это необходимо для выбора расположения систем ИВПВ, включая проектирование зон санитарной охраны. В первую очередь учитывается водохозяйственный баланс, который составляется обычно по речным бассейнам и входит в генеральные планы развития административных районов (до области — края и даже районов включительно).

Водохозяйственный баланс составляется исходя из рационального использования поверхностных и подземных вод, включая экономические показатели, повторное использование воды, оборотное водоснабжение и безвозвратные потери; последние принимаются по мере улучшения использования воды в размере 20—30% и меньше от потребления. При составлении водохозяйственного баланса учитывается также организация охраны водных ресурсов от загрязнения и истощения, а также другие мероприятия, например регулирование поверхностного стока. В водохозяйственный баланс входят данные о расходах поверхностных и подземных вод, млн. м³, данные по воде среднего по водоносности года, маловодного года по расчетной обеспеченности, а также маловодных летнего и зимнего месяцев. Необходимо иметь прогноз об эксплуатационных запасах подземных вод. Затем для тех же периодов в водохозяйственном балансе приводится потребность в воде и, в частности, для хозяйственно-питьевого водоснабжения, орошения, водного транспорта, рыбного хозяйства, а также учитывается минимальный допустимый сток в реке. Таким образом, при проектировании систем ИВПВ необходимо учитывать распределение водохозяйственного баланса, а использование источника ИВПВ согласовывать с соответствующими организациями.

В СССР ИВПВ стало более широко развиваться недавно. Поэтому в водохозяйственных балансах оно пока учитывается редко, и в связи с этим при проектировании сис-

тем ИВПВ отмеченные показатели водохозяйственного баланса следует уточнять.

В 1981 г. было опубликовано постановление Центрального Комитета КПСС и Совета Министров СССР «О мерах по дальнейшему улучшению проектно-сметного дела» (№ 312, 1981 г.) и в развитие этого постановления «Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектов и смет на строительство предприятий, зданий и сооружений» (СН 202—81).

На основании утвержденных схем развития производительных сил и размещения отраслей народного хозяйства обосновывается целесообразность проектирования новых, реконструкция и расширение предприятий и сооружений. Проектирование по СН 202—81 выполняется примерно так же, как по СН 202—76, т. е. в две стадии (проект со сводным расчетом и рабочая документация по сметам) и в одну стадию (рабочий проект со сводными сметами стоимости). Основанием для проектирования является районная схема. Следует учесть, что «Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям пресных вод Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых при Совете Министров СССР (ГКЗ) [12] и «Схема последовательности стадий исследований» Министерства геологии СССР не предусматривают ИВПВ.

При сложности ИВПВ рекомендуется проектирование новых систем выполнять в две стадии, а при развитии действующих систем или при наличии хорошего аналога — в одну стадию.

Учитывая приведенные документы, а также имеющуюся практику, проектирование систем ИВПВ предлагается выполнять с учетом вышеуказанных стадий исследований и изученности условий по схеме последовательности оценки эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном восполнении, стадий изысканий и проектирования систем ИВПВ (прил. 1). В этой схеме комплексно предусматриваются гидрогеологические, гидрологические и санитарные поstadийные исследования с оценкой изученности для проектирования систем ИВПВ. При эксплуатации систем ИВПВ должны проводиться стационарные наблюдения за режимом подземных вод и работой сооружений ИВПВ, которые вместе с некоторыми дополнительными исследованиями являются основой для проектирования развития объекта ИВПВ.

Анализ возможности использования для водоснабжения систем ИВПВ и выбор их схем следует начинать с самых

ранних стадий изысканий. Поэтому проектировщики систем ИВПВ на всех стадиях изысканий должны принимать участие и анализировать полученные результаты.

Согласно распоряжению Министерства геологии СССР от 25 ноября 1981 г. за № 438-Д вместо прежнего ТЭО (при утверждении эксплуатационных запасов подземных вод) составляется «ТЭД по определению кондиций».

Порядок и содержание гидрогеологических исследований для обоснования проектирования ИВПВ, приведенные в приложении I, могут изменяться в зависимости от изученности эксплуатационных запасов и природных условий. Важным в детальной разведке эксплуатационных запасов являются опытные работы по ИВПВ в натуре. Однако для оценки по высокой категории и изученности при наличии хорошего аналога целью предварительной разведки может быть получение большей информации, и опытные работы по ИВПВ могут быть заменены анализом сравнения условий исследуемого объекта с аналогом, где имеется опыт ИВПВ. При этом сопоставляются природные условия, возможность их изменения при эксплуатации системы ИВПВ и проводятся только лабораторные исследования. В этом случае по предварительной разведке объекта исследования можно обосновать оценку по высоким категориям изученности эксплуатационных запасов и получить обоснование техно-рабочего проекта. Процентное соотношение категорий изученности для ИВПВ при утверждении эксплуатационных запасов пока не регламентировано. При проектировании в одну и две стадии можно принять изученность эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением для I очереди строительства 50% по А и 50% по Б, а для расчетного срока примерно 25% по А, 25—50% по Б и 50—25% по С₁, согласуя это для конкретных объектов с ГКЗ.

3. ОБЩАЯ СХЕМА ВОДОСНАБЖЕНИЯ

При водоснабжении с системой ИВПВ возникает вопрос о наиболее полном рациональном использовании расхода такой системы. При кондиционном качестве воды система ИВПВ должна удовлетворять потребность, которая изменяется в течение расчетного срока, — по годам, сезонам, суткам в течение недели, а также по часам в течение суток. Изменение по годам обычно связано с общим ростом потребности, а также с некоторыми дополнительными условиями: например, в засушливые годы, когда и расход источника водоснабжения уменьшается. Изменение по сезонам и в

течение недели суточного расхода, а также и часового зависит от климата, благоустройства города, уклада жизни населения, режима работы предприятий и учреждений, потребности для полива улиц и зеленых насаждений, а также сезонного изменения численности населения. В Сочи, например, потребность в воде увеличивается в конце весны, летом и осенью в 2 раза по сравнению с зимним периодом. Такие изменения расхода учитывают при проектировании, а коэффициенты суточной и часовой неравномерности (максимальные и минимальные) приведены в руководствах по водоснабжению, справочниках [32] и СНиП II-31-74. Однако в зависимости от местных условий могут быть отклонения от нормативов. Важно, чтобы система искусственного восполнения удовлетворяла эту неравномерную по величине потребность. Если регулирующие емкости в системе водоснабжения малы, то расход системы ИВПВ для удовлетворения потребности будет неравномерным. Например, для города с населением 100 тыс. жителей, используя данные Справочника [32], можно вычислить максимальный часовой расход примерно 1,5—2 и минимальный 0,2—0,4 от среднечасового. А. А. Лубянских для одного из городов сделал анализ водозаборов подземных вод, чтобы выявить возможность повышения их эффективности путем устройства дополнительных регулирующих емкостей для более равномерной работы указанных водозаборов. Суточная подача водозаборов составляла ранее 170 тыс. м³/сут воды при возможностях 215 тыс. м³/сут. Максимальный часовой коэффициент неравномерности потребления по А. А. Лубянских в рассматриваемом городе составлял 1,1—1,5 и минимальный 0,5—0,8. Регулирующая емкость всех резервуаров была 20,35 тыс. м³. Следует также учесть, что в ночное время давление на некоторых участках водопроводной сети городов повышалось до 1 МПа при требуемом 0,75 МПа, при этом в ночные часы число аварий на наружной сети составляло 70% общего их числа.

В связи с этим по теории случайных функций с обработкой на ЭЦВМ «Минск-32» были произведены расчеты рационального использования подачи водозаборов и емкости регулирующих резервуаров были увеличены на 47,3 тыс. м³. На насосных станциях II подъема установили насосы с регулирующим приводом для изменения частоты вращения в зависимости от давления в диктующей точке, устранили непроизводительные расходы — аварийные утечки. Водозабор стал работать равномерно. Вся система была оборудована автоматической беспроводной связью, позволяющей регулировать давление в сети, наполнение резер-

вуаров и работу насосов. Годовая эффективность составила 480 тыс. руб. при сроке окупаемости капиталовложений всего два года. Следует отметить, что в рассматриваемом примере была учтена возможность доиспользования расхода водозабора подземных вод, мощностей насосных станций I подъема и пропускной способности водоводов. При большей амплитуде часовых коэффициентов неравномерности и при недостаточной регулирующей вместимости резервуаров использование водозаборов подземных вод будет хуже и с искусственным восполнением. Учитывая неравномерность потребления воды для хозяйственно-питьевых целей, следует учитывать также потребности воды на пожаротушение и для промышленных целей.

В некоторых случаях приходится отказываться от использования системы ИВПВ. Например, для одного города выгодней, оказалось, использовать поверхностные воды с полной очисткой, так как городская водопроводная сеть почти не потребовала дополнительных капиталовложений. В то время как развитие системы ИВПВ в данном городе потребовало бы значительных капиталовложений. Объясняется это тем, что система ИВПВ и вариант водозабора из поверхностных вод находятся на противоположных сторонах города.

Таким образом, выбор и экономическую оценку варианта источника водоснабжения следует производить в целом при оценке всей системы водоснабжения.

4. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ИВПВ

Категории надежности подачи воды в систему водоснабжения приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что большинство систем водоснабжения при числе жителей более 50 тыс. должно относиться по надежности к I категории, по которой допускается снижение подачи не более чем 30% в течение 1—3 сут, при числе жителей до 50 тыс. — до 30% в течение месяца или перерыв подачи воды в течение 3—5 ч (II категория). Частота указанного снижения подачи воды не регламентируется. При таких требованиях для I категории надежности поверхностные водозаборы как источник ИВПВ должны иметь обеспеченность 95% по расходу и для II категории (население от 0,5 до 50 тыс. жителей) — 90%. Следует иметь в виду, что при ИВПВ водоносный горизонт во многих случаях практически имеет резервную емкость и в связи с этим может значительно повысить процент обеспеченности при надлежащих расчетно-

эксплуатационных показателях водозаборов. Но еще более важна обеспеченность надежного качества воды при ИВПВ по сравнению с использованием поверхностных вод с полной очисткой, что особенно важно при залповых (кратковременных) загрязнениях поверхностных вод. Дело в том, что водозаборы от инфильтрационных сооружений располагают обычно на расстояниях 50—100 м, редко меньше, а иногда и больше, а скорости движения инфильтрационной поверхностной воды в водоносном горизонте принимаются около 1—2 м/сут. Время поступления воды к водозаборам составляет обычно около 25—100 сут. При этом около водозаборов снижаются концентрации загрязнения в водоносном горизонте, который намного повышает надежность систем ИВПВ, выполняя защитную барьерную роль.

Следовательно, по качеству подаваемой воды и расходу система ИВПВ является значительно надежнее водозаборов поверхностных вод с полной их очисткой. Надежность источников водоснабжения, к сожалению, в экономических показателях пока не разработана.

5. ТЕХНИЧЕСКИЕ НОРМАТИВЫ, РУКОВОДСТВА И СОГЛАСОВАНИЯ

Специальные обязательные нормативы для проектирования систем ИВПВ в СССР не разработаны. В ГДР такие нормативы опубликованы (1970—1973 гг.). В настоящей работе они учитываются. Однако ряд общих нормативов СССР для проектирования систем ИВПВ можно использовать. Прежде всего являются обязательными законы, а также постановления и решения КПСС, правительства СССР и Верховного Совета СССР и Верховных Советов союзных республик, например, «Основы водного законодательства Союза ССР и союзных республик». По оценке качества питьевой воды следует руководствоваться ГОСТ 2874—73. При выборе поверхностного источника ИВПВ рекомендуется пользоваться ГОСТ 17.1.3.03—77, СНиП II-31—74, а также указаниями Министерства здравоохранения СССР о предельно допустимых концентрациях вредных веществ и др. Выбор источника ИВПВ и участок для него должны быть согласованы с соответствующими органами — исполкомом местного Совета депутатов трудящихся, Государственной санитарной инспекцией, Бассейновой инспекцией и Инспекцией по охране рыбных запасов (для поверхностных вод), территориаль-

ным геологическим управлением, Министерством геологии СССР, а также заинтересованными организациями по эксплуатации, электроснабжению и др. При оценке эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным восполнением можно руководствоваться работой Н. А. Плотникова и К. И. Сычева [20] и инструкцией ГКЗ [12]. Кроме того, по отдельным ведомствам разработаны рекомендации по расчетам, проектированию, эксплуатации и наблюдениям за режимом эксплуатации ИВПВ [27—29].

Глава V. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В СИСТЕМАХ ИВПВ

1. ОСНОВЫ УЛУЧШЕНИЯ

В качестве исходной воды для ИВПВ, как правило, берется поверхностная вода из рек, озер, водохранилищ. Эту воду нельзя использовать для хозяйственно-питьевого водоснабжения, так как по ряду показателей (мутности, санитарным бактериальным показателям) она не отвечает требованиям ГОСТ 2874—73, поэтому ее необходимо улучшать. В отличие от обычной очистки воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения улучшение качества воды для I типа систем ИВПВ осуществляют в инфильтрационных бассейнах, а для III типа — при поверхностной инфильтрации. Затем частичное улучшение качества воды для всех типов ИВПВ происходит в водоносном горизонте. Такой способ улучшения качества поверхностных вод является особенностью ИВПВ при сравнении с обычной очисткой для хозяйственно-питьевого водоснабжения. В ряде случаев в системах ИВПВ I типа и главным образом для II типа применяют дополнительно очистные сооружения предварительной водоподготовки перед поступлением воды в инфильтрационные бассейны и в инфильтрационные скважины, а также при улучшении качества воды после водозаборов подземных вод для всех типов систем ИВПВ. Для некоторых таких сооружений отстойники устраивают открытыми, часто в виде котлованов в грунте и без перегородок.

В настоящее время достаточно разработаны теоретические основы методики улучшения качества воды и имеется значительный практический опыт водоподготовки при искусственном восполнении. Однако эта задача еще не всегда может быть решена однозначно, что зависит как от качества исходной воды, типа ИВПВ, так и от недостаточно четких теоретических разработок.

Улучшение качества воды связано со следующими процессами:

физическим и, в частности, механическим осаждением взвешенных частиц и организмов в воде и задерживанием их в решетках, сетках, пленке и в рыхлых грунтах. Эффект механического действия может улучшаться путем дополнительной обработки воды (введением коагулянтов и флокулянтов);

химическим и физико-химическим;
биологическим.

Кроме того, физические, химические и физико-химические процессы сопровождаются физической и химической сорбцией, адгезией, ионным обменом, коагуляцией и флокуляцией.

Все эти процессы часто взаимодействуют и зависят от физических, химических, физико-химических и биологических условий (температура, свет, pH, насыщенность кислородом, наличие ПАВ, наличие одноклеточных и многоклеточных низших и высших организмов). Так, при pH меньше 5 и больше 8 бактериологическая активность снижается.

На процесс улучшения качества воды влияют различные химические соединения, а также их концентрация в воде.

Например, размножение бактерий может происходить сначала без наличия фосфора в воде, но для благоприятного дальнейшего их развития требуется фосфор, хотя и в незначительных концентрациях. Для хорошего развития водорослей необходима концентрация фосфора порядка 0,1—1 мг/л.

Для развития в воде растительных организмов, усваивающих углекислоту, необходим свет.

Наиболее полно изучены теория и методика улучшения качества воды в очистных сооружениях для водоснабжения и канализации, особенно в отстойниках и скорых фильтрах. Однако в системе искусственного восполнения процессы, происходящие в отдельных его элементах — при поверхностной инфильтрации, в бассейнах и прудах, зоне аэрации и водоносном горизонте по своим условиям значительно

отличаются от процессов, происходящих в очистных сооружениях для водоснабжения и канализации. Прежде всего в водоносном горизонте и при поверхностной инфильтрации вертикальная и горизонтальная скорости движения воды (за исключением некоторых случаев) небольшие (до одного — нескольких метров в сутки). Небольшие горизонтальные скорости движения воды в инфильтрационных бассейнах способствуют осаждению взвешенных частиц, которые под влиянием различных процессов коагулируются, увлекая в осадок бактерии и вирусы. Механическое задерживание взвешенных частиц происходит при поверхностной инфильтрации, а при наличии пленки и мелких осадков практически задерживаются все взвешенные частицы и даже большая часть микроорганизмов. По данным Риннеля (1927 г.), диаметр пор пленки в инфильтрационных бассейнах меньше микрона, т. е. на этой пленке может механически задерживаться ряд бактерий.

В воде бассейнов и прудов (до инфильтрации) развивается планктон и, в частности, сине-зеленые, диатомовые и другие водоросли, которые в естественных условиях способствуют очищению воды. За последние 15—20 лет проводились исследования влияния камыша-куги, рогоза широколистного и других водных растений на улучшение качества воды. Такие растения поглощают ряд вредных веществ (фенол и др.). Растворенный в воде бассейна кислород окисляет органическое вещество и способствует развитию растительности. На солнечном свете погибают многие бактерии, в особенности патогенные.

Таким образом, в инфильтрационных бассейнах еще до инфильтрации качество воды может весьма заметно улучшаться. Однако при бурном развитии организмов, например водорослей, качество воды возможно ухудшится. По данным исследований очистки воды для водоснабжения при отстаивании и фильтровании, в особенности с коагулированием, и при снижении мутности воды до 0,5 мг/л, вирусы удаляются до 97—98 %, а бактерии — до 2—10 клеток/мл (по санитарному анализу).

Теория и практические положения очистки воды при инфильтрации хорошо освещены в работах советских ученых (Д. Н. Минц, С. А. Шуберт, В. А. Клячко, В. П. Криштул, А. М. Перлина, В. М. Берданов, И. Э. Апельцин и др.). В зоне аэрации в водоносном горизонте улучшение качества воды может происходить в результате прилипания (адгезия) частиц и микроорганизмов к зернам породы и к ранее прилипшим частицам.

Не входя в детали анализа процесса прилипания, нам представляются более правильными взгляды Д. Н. Минца, С. А. Шуберта, В. П. Криштула, А. М. Перлиной и других, которые рассматривают процессы задерживания различных частиц при объемном скором фильтровании как суммарное явление накопления осадка и его частичное разрушение. Теоретически водоносный горизонт и зона аэрации работают по такому же принципу улучшения качества воды. При этом чем мельче зерна грунта, тем больше их удельная площадь поверхности и, следовательно, тем больше задерживающая способность. В то же время отличие процессов задерживания частиц в водоносном горизонте по сравнению со скорыми фильтрами заключается в том, что вода поступает в водоносный горизонт после инфильтрационных бассейнов со скоростью движения до 1—3 м/сут, т. е. много медленнее, чем в скорых фильтрах, и при этом или без муты, или с ничтожным количеством муты (не более 1—3 мг/л). Кроме того, водоносный горизонт по вместимости значительно больше скорых фильтров. Следует заметить, что поглощающая вместимость водоносных горизонтов не бесконечна, поэтому необходимо рационально использовать возможность их очищающей способности. Одним из важных факторов улучшения качества воды при микробном (и вирусном) загрязнении является продолжительность времени выживаемости, дальность распространения бактерий и других организмов в зоне аэрации и в водоносном горизонте, а также сохранение вирулентности патогенных микроорганизмов.

В последние годы теоретическими работами отечественных (Д. Г. Звягинцев, 1973, и др.) и зарубежных ученых выявлены очень важные закономерности взаимодействия между микроорганизмами и поверхностями твердых тел, находящихся в водной среде. На поверхности твердых тел в водной среде физические и химические условия отличаются от условий самой среды, например по концентрации растворенных веществ, рН (может быть разница на 0,5—2 единицы), активности ионов водорода и др. На поверхностях в водоносных песках микробы могут оказаться в более благоприятных условиях для развития, чем непосредственно в подземной воде. Поэтому биологические исследования только подземной воды без учета водоносных песков могут дать неправильное представление. Следует учесть, что неорганические и органические частицы меньше клетки, близкие по размерам коллоидным частицам, прилипают к клетке. Это существенно влияет на жизнедеятельность клетки.

По данным Н. Е. Орадовской и Е. И. Моложавой [17], в песках и ракушечниках в воде выживаемость санитарно-показательных бактерий (кишечная палочка, энтерококка, споровые формы бактерий), патогенных энтеробактерий (возбудители брюшного тифа, паратифа, дизентерии), фага кишечной палочки и вируса полиомиелита изменяется от 50 до 400 сут в зависимости от вида микроба, температуры (от 4 до 20°C), плотности заражения (10^2 — 10^8 м.т/л*), а также состава воды. Наибольшая выживаемость отмечена у сальмонелл паратифа В—400 сут при плотности заражения 10^4 м.т/л, выживаемость этих сальмонелл в известняках при плотности заражения 10^2 и 10^4 м.т/л была всего 40—85 сут. Энтеробактерии в песках с водой сохраняют большую жизнеспособность, чем непосредственно в воде. Это обстоятельство, т. е. более благоприятные условия выживаемости энтеробактерий на поверхности твердых тел, описано в ряде работ и, в частности, у Д. Г. Звягинцева (в 1973 г.). При наличии детергентов, фенолов, нефтепродуктов и фосфорорганических веществ на уровне ПДК выживаемость бактерий не изменялась, а при повышенных концентрациях сульфанола НП-1 (5 мг/л) удлинялась. Вирулентность у сальмонелл брюшного типа и паратифа В сохранялась в течение всего периода выживания, а у возбудителя дизентерии—2 мес с момента попадания в водоносные породы.

По другим данным отмечается выживаемость бактерий более года, что, видимо, определяется другими условиями. По данным Ю. Г. Талаевой и Г. А. Багдасаряна, в воде (без породы) выживаемость бактерий составляет: возбудители дизентерии—1—2 недели, сальмонеллы до 1—2 мес, вирусы—до 4—5 мес, что также зависит, видимо, от среды, в которой находятся микроорганизмы. По данным Е. И. Моложавой, в летний период при температуре воды 24—25°C в зоне аэрации на глубине 50—100 см под пленкой инфильтрационного бассейна могут создаваться благоприятные условия для размножения сапрофитов и бактерий группы кишечной палочки в результате увеличения концентрации органики. Но в дальнейшем при фильтрации в водоносных рыхлых породах, и в особенности с мелкозернистыми песками, происходит полная очистка от бактерий на пути длиной 40 м. По другим данным (натурным) в зоне аэрации развитие различных микроорганизмов идет обычно незначительно в зависимости от питательных ве-

* Микробных тел на 1 л.

ществ, температуры, содержания кислорода и других условий, но нередко даже и подавляется.

Для прогнозов проникания микроорганизмов в подземные воды А. Е. Орадовская и Е. И. Моложавая [17] рекомендуют принимать их выживаемость при исходных малозагрязненных поверхностных водах 200 сут и при сильно загрязненных 400 сут.

По данным работы «Основы санитарной вирусологии» (1977) выживаемость в подземной пресной воде вируса полиомиелита при температуре 4—8°C составляет 84—112 сут, вируса Коксаки А5 при температуре 4—20°C — 280 сут, а в автоклавированной водопроводной воде до 780 сут. Интересно отметить, что, например, вирус Коксаки при температуре 17°C сохранялся в стерильной воде 80 сут, в связи с живыми бактериями — 140 сут и в смеси с убитыми бактериями — 260 сут. Это еще раз подтверждает наше замечание о необходимости учета взаимосвязи организмов с окружающей средой. Миграция микроорганизмов в подземных водах рассчитывается [9] на основе уравнения кинетики адгезии (сорбции) *

$$\partial N / \partial t = \alpha (N_0 - N) C, \quad (1)$$

где N — количество сорбированных микроорганизмов; t — время; α — параметр кинетики адгезии (сорбции); N_0 — полная емкость адгезии породы; C — концентрация микроорганизмов в воде.

Используя уравнение (1), можно приближенно практически решать вопросы микро-биологического самоочищения подземных вод в самых простых случаях. Параметр α в уравнении (1) необходимо определять для совершенно конкретных условий. Следует иметь в виду, что по последним исследованиям во многих чистых (по бактериологическим санитарным показателям) подземных водах, включая и артезианские, обнаружены непатогенные бактерии в количестве до 10^3 — 10^4 кл/мл и более.

Задерживать различные вредные вещества в водоносном горизонте, используя его сорбционную возможность, можно при небольших концентрациях некоторых из этих веществ и при кратковременном загрязнении. Это определяется относительно ограниченной сорбционной емкостью водоносного горизонта. В таких условиях водоносный горизонт играет важную барьерную роль.

* Ряд авторов употребляет термин сорбция, но строго прилипание организмов основывается на явлении адгезии.

2. СХЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ

В качестве исходной воды для ИВПВ берется почти исключительно поверхностная вода, которая по качеству обычно не удовлетворяет требованиям хозяйственно-питьевого водоснабжения. В связи с этим исходная вода ИВПВ нуждается в улучшении, способы которого в зависимости от качества исходной воды, а также условий работы и типов систем ИВПВ бывают весьма разнообразны.

Рассмотрим сначала I открытый тип ИВПВ, где поверхностная вода фильтруется в водоносный горизонт через инфильтрационные бассейны и каналы. В таких инфильтрационных сооружениях исходная вода может значительно улучшаться в ряде случаев даже без предварительной очистки, имеется в виду и дополнительное улучшение качества воды в водоносном горизонте. При увеличении мутности воды, обычно более 10—20 мг/л, и при наличии вредных веществ, которые не могут задерживаться при инфильтрации в водоносном горизонте, требуется предварительная водоподготовка, чаще всего уменьшение мутности в отстойниках, в скорых и сверхскорых фильтрах, а также предварительное хлорирование и реже другие виды водоподготовки в зависимости от качества исходной воды.

В некоторых случаях, когда вода, получаемая водозаборами в системе искусственного восполнения подземных вод, не отвечает кондиционным требованиям питьевой воды, подключают последующее улучшение качества воды, например, обеззараживанием, преимущественно хлорированием. Таким образом, для I типа ИВПВ могут быть применены следующие схемы улучшения качества воды:

инфильтрационные открытые сооружения и водоносный горизонт (без предварительного и последующего улучшения качества воды);

предварительная водоподготовка, инфильтрационные открытые сооружения и водоносный горизонт (без последующего улучшения качества воды);

предварительная водоподготовка, инфильтрационные сооружения, водоносный горизонт и последующее улучшение качества воды;

инфильтрационные открытые сооружения, водоносный горизонт, последующее улучшение качества воды (без предварительной водоподготовки).

Чаще всего встречается третья схема с простой предварительной водоподготовкой в открытых отстойниках, с аэрацией перед инфильтрационными бассейнами и последующим улучшением качества воды хлорированием.

Для II закрытого типа ИВПВ, где для инфильтрации используются поглощающие скважины, как правило, должна быть предварительная водоподготовка с доведением качества поверхностной воды до требований ГОСТ 2874—73. В связи с этим применяют две схемы улучшения качества воды: предварительную водоподготовку, водоносный горизонт P_1 ; предварительную водоподготовку, водоносный горизонт, последующее улучшение качества P_2 .

Предварительная водоподготовка для II типа ИВПВ применяется в связи с тем, что при мутности поверхностной воды более 1—3 мг/л быстро засоряются инфильтрационные скважины и дебит их падает. Кроме того, поверхностные воды обычно загрязнены и, в частности, бактериально.

Для III типа простых систем ИВПВ с открытой инфильтрацией должны быть благоприятные природные условия (нередко с небольшими улучшениями) и поверхностные воды для восполнения относительно чистые, не сильно мутные и бактериально не очень загрязненные. Поэтому улучшение их качества происходит при инфильтрации в природных условиях и в самом водоносном горизонте. В дальнейшем вода, полученная из водозаборов, обычно подвергается хлорированию и реже фундаментальному последующему улучшению качества воды. Некоторые отступления, вернее детализация схем улучшения качества воды, не исключаются. Не следует забывать, что улучшение качества поверхностных вод в системах ИВПВ необходимо начинать с источника восполнения — поверхностных вод и водозабора из них. Прежде всего нужно охранять поверхностные воды от загрязнения и выбирать для этого соответствующий участок с наиболее благоприятным расположением приемного отверстия водозабора, чтобы в него попадало как можно меньше муты. Для этого должен быть сделан компетентный гидрологический, биологический и санитарный анализ. Затем необходимо учитывать возможное вредное влияние шуги, донного и поверхностного льда, а также другие неблагоприятные факторы — обрастание, поступление в водозабор водорослей и пр. Сооружения ИВПВ по последовательности поступления воды в них целесообразно располагать по естественному уклону местности с учетом потерь напора в сооружениях, трубах и измерительных приборах.

3. ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ВОДЫ

ВОДА, ПОДАВАЕМАЯ ПОТРЕБИТЕЛЮ ДЛЯ ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВЫХ ЦЕЛЕЙ

В СССР вода, подаваемая потребителю для хозяйственно-питьевых целей, должна отвечать требованиям ГОСТ 2874—73; несоблюдение этого ГОСТа преследуется законом. Следовательно, вода, получаемая из водоносного горизонта с искусственным восполнением, при несоответствии ГОСТу должна проходить последующую очистку. В указанном ГОСТе приводятся предельные нормы для питьевой воды: бактериальные показатели; общие физические и химические показатели; концентрация токсических веществ и органолептические показатели.

Общее число бактерий должно быть не более 100 в 1 мл, а бактерий группы кишечной палочки при определенных условиях устанавливается по показателю коли-индекс не более трех бактерий в 1 л воды и по показателю колититр — не менее 300 мл на 1 кишечную бактерию. Концентрация вредных веществ по табл. 2 ГОСТ 2874—73 должна быть, мг/л: бериллия (Be^{2+}) не более 0,0002; молибдена (Mo^{2+}) — 0,5; мышьяка ($As^{3+}, 5+$) — 0,05; нитратов (по N) — 10,0; полиакриламида — 2; свинца (Pb^{2+}) — 0,1; селена (Se^{6+}) — 0,001; стронция (Sr^{2+}) — 2; фтора (F^-) для I и II климатических районов — 1,5, для III — 1, 2, для IV — 0,7; природного урана (U) и урана-238 — 1,7; предельные показатели для радия-226 (Ra) и стронция-90 (Sr) — соответственно $1,2 \cdot 10^{-10}$ и $4 \cdot 10^{-10}$ Кюри/л. Допустимая концентрация других веществ по табл. 4 ГОСТ 2874—73 принимается (в мг/л) не более: сухого остатка — 1000; хлоридов (Cl^-) — 350; сульфатов (So^{2-}) — 500; железа ($Fe^{2+}, 3+$) — 0,3; марганца (Mn^{2+}) — 0,1; меди (Cu^{2+}) — 1,0; цинка (Zn^{2+}) — 5,0; остаточного алюминия (Al^{3+}) — 0,5; гексаметафосфата (PO_4) — 3,5; триполифосфата (PO_4) — 3,5, а общей жесткости не более 7 мг-экв/л.

Концентрация сухого остатка в воде должна быть не более 1000 мг/л, но по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы допускается до 1500 мг/л, а общая жесткость — до 10 мг-экв/л. Для подземных вод без установок для обезжелезивания концентрация железа допускается до 1 мг/л.

Суммарная концентрация токсичных веществ, а также суммарное содержание сульфатов и хлоридов, если последние придают воде привкус, не должно быть более от суммы

долевых частей (по отношению к их предельной допустимой концентрации)

$$\frac{\bar{C}_1}{C_1} + \frac{\bar{C}_2}{C_2} + \dots + \frac{\bar{C}_n}{C_n} \leq 1, \quad (2)$$

где $\bar{C}_1, \bar{C}_2, \dots, \bar{C}_n$ — обнаруженные концентрации, мг/л; $C_1, C_2, \dots, C_n$ — предельные концентрации по норме, мг/л.

По указанному ГОСТу водородный показатель pH должен быть в пределах 6,5–8,5. Следует учитывать также дополнительные рекомендации о допустимых концентрациях различных веществ для водоемов, установленные Минздравом СССР. Остаются в силе показатели предельно-максимальных концентраций веществ, не вошедших в ГОСТ 2874–73, утвержденные 28 декабря 1973 г. за № 1003–72 («Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде водоемов санитарно-бытового водопользования и требования к составу и свойствам воды водоемов у пунктов питьевого и культурно-бытового водопользования»). К таким веществам относятся, мг/л: ртуть 0,005; никель 1; кобальт 1; кадмий 0,01; нитраты (по азоту) 10; аммиак (по азоту) 2; цианиды (в расчете на циан) 0,1 и др. Пределы органолептических свойств приняты: запах при 20°C и подогревании воды до 60°C 2 балла, привкус при 20°C 2 балла, цветность по платино-кобальтовой шкале 20 градусов и мутность по стандартной шкале 1,5 мг/л. Цветность часто зависит от гумусов. Наиболее окрашенными являются гуминовые кислоты, которые сравнительно легко разлагаются; фульвокислоты, входящие в гумус, особенно истинно растворимые, наименее окрашены, но разлагаются значительно труднее.

Запахи и привкусы являются чаще биологического происхождения в результате жизнедеятельности и отмирания микро- и макроорганизмов в воде; наиболее устойчивый и труднорастворимый землистый и затхлый запах вызывается актиномицетами.

В рекомендациях Минздрава СССР дополнительно приводятся также предельные концентрации ряда органолептических показателей веществ (мг/л), например бария (Ba^{2+}) 4; железа (Fe^{3+}) 0,5; нафтеновых кислот 0,3; фенола (карболовая кислота) 0,001; хрома (Cr^{6+}) 0,1; хрома (Cr^{3+}) 0,5; некоторых ПАВ (АБС, ДНС и др.) 0,5 и др.

В стандарте США USPHS, 1962 г. (установленные и по рекомендации) некоторые требования к питьевой воде более жесткие, например общая минерализация допускается не более 500 мг/л, бария не более 1 мг/л,

сульфатов не более 250 мг/л, свинца 0,05 мг/л, но по некоторым показателям требования более низкие, например нитратов допускается 45 мг/л, аммония 10 мг/л (без указания его природы), селена 0,01 мг/л, радия-226 $3 \cdot 10^{-10}$ Кюри/л.

«Европейские нормы качества воды Всемирной организации труда» (1963) также несколько отличаются от стандарта СССР. Наибольшее отличие отмечается в требованиях по радиоактивности (менее жесткие), а также по концентрации кишечной палочки (более жесткие): в 95 % проб воды объемом 100 мл каждая не должно быть кишечной палочки. Наши требования к качеству питьевой воды отличаются от требований и в других странах. Например, в ГДР концентрация железа не должна превышать 0,1 мг/л, марганца 0,05 мг/л. В связи с этим в ГДР вода, получаемая из водозаборов систем ИВПВ, нередко подвергается последующему улучшению для снижения концентраций железа и марганца.

В требованиях к качеству хозяйственно-питьевых вод не входят показатели наличия в них вредных и опасных растительных и животных одноклеточных и многоклеточных микроорганизмов, например амёб и др. Некоторые из них, в частности амёбы из отряда простейших животных класса корненожек, микроскопически малы, при неблагоприятных условиях превращаются в цисту. Большое число амёб паразитирует у человека и животных; одна из амёб является возбудителем очень опасной амёбной дизентерии.

В ГОСТ 2874–73 также нет показателей по вирусам. Но предельные показатели по кишечной палочке и количеству бактерий в указанном ГОСТе обычно позволяют оценить воду, как безвредную по вирусам. Однако в подозрительных случаях в исследовании подземных вод для хозяйственно-питьевых целей следует включать специальный гидробиологический анализ, и в частности на патогенные организмы.

Питьевая вода не должна содержать видимых организмов и не должна иметь на поверхности пленку.

ВОДА, ПОДАВАЕМАЯ В СИСТЕМУ ИВПВ

При рассмотрении требований к качеству поверхностных вод, подаваемых в системы ИВПВ, следует учитывать их тип, схемы предварительного и последующего улучшения воды, а также гидрогеологические условия, от которых, в частности, зависит выбор типа ИВПВ и схемы улучшения качества поверхностных вод. Оценка улучше-

ния качества поверхностных вод на протяжении всей системы ИВПВ на разных участках дается ниже.

В главе V п. 2 приведены схемы улучшения качества поверхностной воды для различных типов систем ИВПВ. Поверхностная вода, подаваемая на системы ИВПВ, должна соответствовать требованиям ГОСТ 17.1.3.03—77 с некоторыми дополнениями и изменениями, которые мы рассмотрим для отдельных типов ИВПВ. Особенно следует обратить внимание на концентрацию в воде токсических веществ, которые в системах ИВПВ удаляются трудно: этот вопрос рассмотрим отдельно.

Для I типа ИВПВ инфильтрация в водоносные горизонты производится через бассейны и каналы, которые одновременно являются очистными сооружениями. Очистные возможности и пропускная способность этих сооружений ограничены обычно в основном по мутности воды. В связи с этим, когда поверхностная вода поступает в инфильтрационные бассейны и каналы без предварительной очистки, то качество ее оценивается по специальным нормативам [20, 28, 29]. Эти нормативы несколько отличаются от ГОСТ 17.1.3.03—77 в связи со спецификой условий работ инфильтрационных бассейнов и каналов. В бассейнах и каналах получается довольно хорошая очистка от взвешенных частиц, задерживается значительная часть микроорганизмов и неплохо окисляются органические вещества. Однако в связи с продолжительностью инфильтрационного цикла эта очистка часто лимитируется концентрацией взвешенных частиц и некоторыми другими показателями качества воды. Ранее установленные бактериологические санитарные показатели качества поверхностных вод и планктона нуждаются в изменении (при подаче воды в инфильтрационные бассейны) [19]. С учетом ранее опубликованных работ [20, 21, 28 и 29] и позднейших данных, в частности, опубликованных в работе [19], в табл. 3 приведены требования к качеству поверхностных вод, подаваемых в инфильтрационные бассейны и каналы. Хотя нами учтен опыт эксплуатации систем ИВПВ в разных условиях, однако рекомендации в табл. 3 следует проверять в конкретных условиях и согласовывать с органами санитарно-эпидемиологического надзора.

Требования в табл. 3 несколько отличаются от требований к качеству воды, предлагаемых в работе [24, 29], так как автор относит их к инфильтрационным сооружениям, не указывая типа.

Требования, приведенные в табл. 3, могут изменяться в зависимости от технологических условий в данной систе-

Таблица 3. Требования к качеству поверхностных вод, подаваемых в инфильтрационные бассейны и каналы

Показатели	Требования
1	2
Плавающие вещества и организмы, видимые глазом	Не должны быть
Мутность*, мг/л	В среднем за инфильтрационный цикл не более 5—25, при максимальной мутности не более 50
Железа, мг/л	Не более 3
Реакция, pH	6,5—8,5
Окисляемость перманганатная, мг O ₂ /л	Не более 15
Окисляемость бихроматная, мг O ₂ /л	Не более 30
БПК ₅ **, мг O ₂ /л	Не более 3—10
Растворенного в воде кислорода (после аэрации)	Около полного насыщения (14—8 мг/л при t=1—25°C)
Фосфаты, мг/л	Не более 1
Санитарные бактериальные показатели:	
коли-индекс***	Не более 10000
общее количество бактерий**** в 1 см ³ неразбавленной воды	Не более 10 ⁴ —10 ⁶
Жесткость воды, минерализация, запахи, привкусы, цветность, содержание веществ по показателям — токсикологическим, общесанитарным и органолептическим, после прохождения через водоносный горизонт и разбавления в водоносном горизонте*****	По нормативам

* Уточняется опытным путем в зависимости от механического состава муты, развития планктона, а также оптимальной продолжительности фильтроцикла.

** Свыше 3 мг/дм³ более тщательно проверяется на улучшение качества воды для конкретных условий.

*** Допускается до 100 000, но более тщательно проверяется на улучшение качества воды для конкретных условий.

**** По нашим наблюдениям в натуре на системах ИВПВ.

***** При получении из водозаборов системы ИВПВ воды, не отвечающей требованиям ГОСТ 2874—73, проверяется рациональность улучшения качества воды с последующей очисткой.

ме ИВПВ. Например, при применении травяных бассейнов в ГДР допускается мутность воды до 50 мг/л и более. Нормы ГДР для исходной воды, подаваемой на инфильтрационные бассейны, несколько отличаются. Например, в исходной воде допускается сухой остаток ≥ 500 —800 мг/л, общая жесткость ≥ 11 —29 мг. экв/л, фенолы $\geq 0,02$ мг/л, цианиды $\geq 0,01$ —0,02 мг/л, марганец 0,3 мг/л, общее железо $\geq 0,5$ —1 мг/л.

Во всех случаях качество исходной воды должно быть согласовано с государственной санитарной инспекцией. Это учитывается при характеристике типов ИВПВ, природных и санитарно-технических условий.

Исходная вода, подаваемая в бассейны, каналы, поглощающие скважины и другие инфильтрационные сооружения, должна быть совместима с подземными водами, т. е. при смешивании с ними не должна способствовать выпадению осадков, а также не растворять водоносные породы.

Осадки могут выпадать, например, при исходной воде, богатой кислородом, при наличии восстановительных условий в водоносном горизонте. При этом если в подземной воде находятся соли железа в закисной форме, то произойдет окисление ее с выпадением в осадок гидрата окиси железа. Такое явление наблюдается часто. Выпадению закисного железа способствуют также и железобактерии. Если исходная вода содержит агрессивную углекислоту, то может происходить, например, растворение карбонатных пород, что наблюдалось на участке системы ИВПВ на Урале. Там под рыхлыми аллювиальными отложениями залегают трещиноватые известняки, которые при взаимодействии с агрессивной углекислотой в инфильтрационных водах растворяются и в результате образуется карст с провалами. При инфильтрации поверхностной воды в бассейнах под влиянием окислительных процессов и жизнедеятельности планктона подземная вода насыщается углекислотой, часто в избыточном количестве, становится агрессивной и растворяет карбонатные породы.

Кроме прогноза химической совместимости при смешивании поверхностной и подземной воды следует делать прогноз качества получившейся воды. При смешении двух разных по составу вод меняются существовавшие в них независимо друг от друга щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные равновесия. Химическая совместимость при смешивании двух вод надежно устанавливается на основе решения общей задачи о миграционных формах элементов в воде по уравнениям химии. Этот трудоемкий расчет лучше производить с помощью ЭВЦМ по программе «ЭВЦМ» (на языке Фортран IV). Для расчета необходимо знать величину константы устойчивости комплекса и растворимости вещества. Для прогноза совместимости инфильтрационной воды с водоносным горизонтом (подземной водой и породой) проводят компетентный гидрогеохимический и биогидрохимический анализы в каждом конкретном случае.

Качество исходной поверхностной воды для системы ИВПВ II типа принимается по ГОСТ 17.1.3.03—77. До инфильтрации в поглощающих скважинах ее предварительно очищают в соответствии с ГОСТ 2874—73. В отдельных случаях поверхностную воду, не содержащую вредных веществ и мутностью не более 1—3 мг/л, используют без предварительной очистки. Вода из водоносного горизонта хлорируется до полного соответствия требованиям ГОСТ 2874—73. В системе ИВПВ III типа вода должна отвечать требованиям ГОСТ 17.1.3.03—77. Если она поступает из водозабора, то ее необходимо хлорировать и даже проводить последующее улучшение качества.

4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОДЫ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В ряде случаев перед инфильтрацией в водоносный горизонт для I типа ИВПВ и, как правило, перед инфильтрацией в скважины для II типа ИВПВ проводится предварительное улучшение качества поверхностной воды. Улучшение качества воды начинают с организации охраны поверхностных вод от загрязнения, выбора участка и места водозабора, где можно получать воду, в частности, с меньшей мутностью и допустимым содержанием планктона. Конструкцию водозаборов из поверхностных вод предусматривают с учетом требований СНиП II-31—74 [31]. Условия применения различных способов предварительной водоподготовки рассматриваются ниже. Конструкции и расчеты сооружений для очистки воды не рассматриваются, так как эти вопросы опубликованы в специальных работах. Принципы улучшения качества воды при предварительной водоподготовке до подачи на инфильтрационные сооружения ИВПВ аналогичны принципам улучшения качества воды на очистных сооружениях для водоснабжения. Улучшить качество воды для водоснабжения — значит получить воду, отвечающую по качеству требованиям ГОСТ 2874—73. Предварительная водоподготовка при искусственном выполнении заключается в частичном улучшении качества воды для ее дальнейшей очистки на инфильтрационных сооружениях и в водоносном горизонте. Однако при инфильтрации через поглощающие скважины требования к качеству воды повышаются до требований ГОСТ 2874—73. Для предварительной водоподготовки в зависимости от исходных качеств воды и требований к ее улучше-

нию применяют следующие методы: аэрацию, отстаивание, микрофильтрацию, скорое и предварительное фильтрование, хлорирование, коагулирование для интенсификации отстаивания и фильтрования, а также другие методы в зависимости от конкретных условий и, в частности, обезжелезивание и пр.

АЭРАЦИЯ

При максимальном насыщении воды кислородом в инфильтрационных бассейнах и в водоносном горизонте происходит наиболее полное окисление и разложение органического вещества и оптимальное подавление бактерий с уничтожением патогенных. Растворимость кислорода воздуха в воде на 1 л при атмосферном давлении составляет: при 0°C — 10,19 см³, или 14,5 мг/л; при 10°C — 8,84 см³, или 12,4 мг/л; при 20°C — 6,36 см³, или 8,8 мг/л и при 30°C — 5,25 см³, или 7,4 мг/л.

Следовательно, полное насыщение воды кислородом падает в 2 раза при повышении температуры от 0 до 30°C. Однако хотя концентрация кислорода при повышении температуры воды понижается, активность процессов окисления повышается. Следует иметь в виду, что не все органические вещества достаточно хорошо окисляются. Аэрация может производиться путем подачи воды по каскадам (Дортмунд, ФРГ; Круасси, Франция), через разбрызгиватели, типа насадок Вентури в Крифельде, простым изливом из трубы. В некоторых случаях, например в зимнее время, аэрация может осуществляться при поступлении воздуха путем инъекции во всасывающую трубу или при помощи компрессора в напорную трубу, что снижает охлаждение воды. Наибольший дополнительный захват кислорода из воздуха при обычной аэрации составляет 5—8 мг/л. В открытом отстойнике и в инфильтрационных бассейнах вода дополнительно аэрируется воздухом (до 2—5 мг/л). Днем в бассейне при наличии растительного планктона (водорослей) и высших растений происходит также дополнительное насыщение воды кислородом.

Аэрация при подаче воды в инфильтрационные скважины вредна, так как воздух может сильно увеличить сопротивление при движении воды из скважины в водоносный горизонт.

ОТСТАИВАНИЕ

Отстаивание — наиболее часто встречающийся вид предварительной водоподготовки — применяется чаще как

предварительное улучшение качества воды перед фильтрованием. Сооружения для отстаивания выполняются обычно открытые горизонтального типа и в виде ковшей (например, в СССР на ряде объектов, на р. Лек для водоснабжения в Гааге) и запруд, а также в виде открытых вырытых в грунте отстойников. Отстаивание происходит в водохранилищах, озерах (СССР; Магдебург, ФРГ; Онтарио, Канада) и прудах, которые могут быть источниками восполнения подземных вод. Взвешенные частицы в отстойниках задерживаются примерно до 30—80 %, а иногда и более. По различным данным в отстойниках задерживается примерно 25—80 % бактерий; причем зимой несколько меньше, чем летом. В отстойниках до подачи в инфильтрационные бассейны в районе УССР задерживалось до 80 % бактерий. Однако в некоторых системах ИВПВ летом количество бактерий по общему счету увеличивалось, например в системе ИВПВ в долине р. Арагви с 1,7 в реке до 2,7 мл·кл/мл в отстойнике. По сравнению с поверхностными водами в отстойниках незначительно изменяются температура и состав воды. Нередко, особенно в теплый период, под влиянием фотосинтезирующих растений увеличивается концентрация растворенного в воде кислорода. На некоторых объектах систем ИВПВ наблюдается тенденция к подавлению жизнедеятельности микроскопических водорослей (долина р. Арагви). Прилипание коагулянта при отстаивании может интенсифицировать задерживание взвешенных частиц до 92,5 % и бактерий до 90 %. Однако реагенты в системах ИВПВ применяются редко.

МИКРОФИЛЬТРАЦИЯ

Микрофильтрация применяется как самостоятельный метод или в комплексе с другими видами очистки для задерживания грубых взвешенных частиц и особенно в источнике искусственного восполнения, где интенсивно развивается планктон при содержании более 1000 клеток в 1 см³ и продолжительности цветения не менее месяца. В системах ИВПВ на практике при содержании в исходной поверхностной воде клеток водорослей даже до 5—10 мл/дм³, т. е. в 5—10 раз больше вышеуказанных норм, микрофильтры не применяются. Микрофильтры имеют ячейки в свету 40 мкм и задерживают до 75 диатомовых и до 90—95 % сине-зеленых водорослей. Бактерий (по Б. Хантеру) удаляется до 10—20 % и БПК₅ снижается на 5—10 %. При правильной промывке потери напора в сетке составляют 0,2 м. Вода для промывки подается под напором

0,15—0,2 МПа с расходом около 2 % профильтрованной воды.

По нашему мнению, следует проверить в конкретных условиях, насколько целесообразно бороться с водорослями, обрабатывая воду медным купоросом дозами 0,1—0,5 мг/л, а по другим данным до 0,7 мг/л. Заметим, что эти дозы не превышают норм, указанных в ГОСТ 2874—73. Может быть, полезнее допустить оптимальное развитие водорослей. Кстати, дозировать медный купорос необходимо с учетом концентрации меди в исходной воде.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Предварительные фильтры (префильтры) используются без реагента для предварительной очистки поверхностных вод мутностью 50—250 мг/л, снижая мутность фильтрата до 20—50 мг/л при скорости фильтрации 75—120 м/сут [31, 32].

СВЕРХСКОРЫЕ ФИЛЬТРЫ

Сверхскорые фильтры, разработанные Т. Н. Никифоровым (без реагентов) со скоростью фильтрации 800—1200 м/сут, задерживают взвешенные частицы до 70—80 %. Такие напорные фильтры применяют в некоторых системах ИВПВ. Сложность эксплуатации этих фильтров заставляет переходить для предварительного осветления воды в системах ИВПВ к открытым простым горизонтальным фильтрам.

СКОРЫЕ ФИЛЬТРЫ

Скорые фильтры обеспечивают качество фильтрата по ГОСТ 2874—73 и работают без реагентной обработки или после нее. Введение перед фильтрованием флокулянтов ПАА (полиакриламида) активированной кремневой кислоты улучшает работу скорых фильтров — значительно продлевает фильтроцикл и способствует снижению мутности фильтрата. Скорость фильтрации 120—250 м/сут. Такие фильтры следует применять при подготовке воды перед инфильтрацией в подземные воды, например для II типа ИВПВ и особенно при трещиноватых и карстовых породах восполняемого водоносного горизонта. Даже по упрощенной схеме фильтрации на скорых фильтрах без реагентов и при повышенной скорости фильтрации качество фильтрата получается хорошее: мутность снижается на 20—80 % и более, цветность — на 5—20 %, окисляемость — на 8—22 %, коли-индекс улучшается на

30—75 % и общий счет колоний бактерий — на 40—50 % (по санитарным анализам). В системе ИВПВ для водоснабжения г. Базеля вода р. Рейна сначала очищается на скорых фильтрах без реагентов, а затем уже поступает на инфильтрационные бассейны.

ХЛОРИРОВАНИЕ

Хлорирование в системе предварительной водоподготовки применяют как самостоятельный метод, так и в комплексе с другими. Хлорирование проводят для обеззараживания воды, для борьбы с ростом водорослей и для окисления органических веществ и, в частности, веществ, обуславливающих цветность, запах и привкус воды (для их снижения и устранения). Хлорирование в системе ИВПВ применяют в основном при последующем улучшении качества воды и реже при предварительном. Хлорирование производят чистым хлором, но также гипохлоритом кальция ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) и другими соединениями хлора. Дозы хлорирования воды зависят от того, в каком виде хлор вводится в воду, от ее качества и в особенности от pH и температуры, наличия органических веществ, коллоидных веществ, количества микроорганизмов и их резистентности. Кишечная палочка более стойка к хлору, чем ряд патогенных микроорганизмов, вызывающих желудочно-кишечные заболевания. В большинстве случаев коли-индекс является хорошим санитарным индикатором, но при подозрениях на наличие в воде бактерий сибирской язвы, туляремии, вирусов инфекционного гепатита, полиомиелита и других возбудителей заболеваний необходимо проводить специальную биологическую проверку и дополнительные мероприятия по обеззараживанию воды. Кстати, при ИВПВ, в особенности для I типа, борьба с болезнетворными возбудителями облегчается. В Пеории (США) хлорирование (дозой 3 мг/л) грязной воды р. Иллинойс с числом колоний до 70 000 в 1 см³ применяется как самостоятельный метод перед поступлением на инфильтрацию.

При последующем хлорировании, согласно ГОСТ 2874—73, концентрация остаточного свободного хлора должна быть не менее 0,3 и не более 0,5 мг/л при контакте не менее 30 мин или концентрации связанного хлора не менее 0,8 и не более 1,2 мг/л при обязательном часовом контакте в сборных резервуарах и, по-видимому, в водах (до потребителя). Однако последнее должно быть согласовано с санитарной инспекцией, так как в ГОСТе это не предусмотрено. При хлорировании снижается цвет-

ность на 30—60, окисляемость на 10—40 %, подавляется развитие планктона, улучшаются коли-индекс и общий счет колоний. При положительном влиянии хлорирования на улучшение качества воды следует учитывать, что хлорирование может иметь и неблагоприятные последствия. Например, при наличии фенола в воде возникают неприятные привкусы и запахи. При значительном содержании аммиака могут образоваться хлорамины; в результате замедляется распад органического вещества. Таким образом, хлорирование следует применять, взвесив все возможные последствия.

УДАЛЕНИЕ ИЗ ВОДЫ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

При больших, чем по норме, концентрациях токсичных, канцерогенных и других нежелательных веществ следует предусматривать специальное улучшение качества воды. Ряд вредных веществ удаляется из воды простыми методами (например, свинец, медь, титан, ванадий, вольфрам, молибден, бериллий, никель, кобальт, уран, ртуть), а другие — более сложными (мышьяк и др.). Канцерогены задерживаются активированным углем. Методы удаления вредных и нежелательных веществ кратко описаны в работе В. А. Клячко и И. Э. Апельцина (1971 г.).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ВОДОПОДГОТОВКА СИЛЬНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД

В настоящее время технический уровень очистных сооружений позволяет использовать для искусственного восполнения сильно загрязненные речные воды. В этом случае предварительная водоподготовка включает комплекс методов улучшения качества воды, например отстаивание и контактное осветление с коагуляцией; дополнительно при необходимости вводится хлорирование, известкование и углевание для удаления привкусов и запахов в воде.

В районе Круасси (Франция) источником восполнения подземных вод служит сильно загрязненная сточными водами р. Сена. Примерно в августе — октябре искусственное восполнение из р. Сены прекращается из-за ее слишком сильного загрязнения. В этот период эксплуатируют емкостные запасы подземных вод. Предварительная водоподготовка включает введение коагулянта и активированного угля, осветление в отстойниках, быструю фильтрацию, затем аэрацию по каскадам и подачу в инфильтрационные бассейны.

ИВПВ с использованием сильно загрязненных поверхностных вод осуществляют в Западной Европе и частично в США и Японии.

5. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ БАССЕЙНАХ И ЗОНЕ АЭРАЦИИ

Инфильтрационные бассейны устраивают обычно открытые, поэтому на них воздействуют атмосферные факторы, изменчивые во времени (температура, солнечный свет и др.). Пуск воды в бассейн бывает сосредоточенный и рассредоточенный, в частности, с дождеванием. Поверхностная вода поступает в инфильтрационные бассейны загрязненной в разной степени: со средней мутностью до 5—25 мг/л и более.

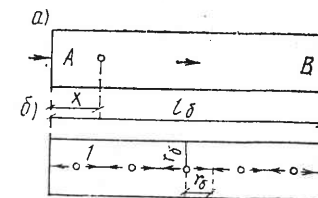


Рис. 7. Схема горизонтального движения воды в бассейне
а — сосредоточенное (с одного конца); б — рассредоточенное; I — выпуски воды при дождевании

Рассмотрим влияние горизонтальной составляющей скорости движения воды в бассейне в зависимости от места впуска воды (рис. 7). Пусть вода движется в бассейне от точки А к точке В; глубина наполнения бассейна h_b и средняя скорость фильтрации v_n . Тогда среднюю горизонтальную составляющую скорости движения воды v_r в зависимости от расстояния x от места впуска воды до точки I определим по формуле

$$v_r = \frac{v_n}{h_b} (l_b - x). \quad (2)$$

Время пребывания воды t_x в бассейне вычислим по формуле

$$t_x = 2,3 \frac{h_b}{v_n} \lg \frac{l_b}{(l_b - x)}. \quad (4)$$

При $h_b/v_n = 0,5$ и $x = 0$ получим $v_r = 2l_b$ м/сут, а при $x = l_b$ горизонтальная составляющая скорости движения воды $v_r = 0$, т. е. v_r изменяется от значительной величины до нуля. Если $h_b/v_n = 0,5$, то время пребывания воды при приближении к точке В при $x = 0,9l_b$ составляет 1,15 сут. При этом время пребывания воды в бассейне не зависит от длины бассейна, а скорость движения воды значительно зависит от этой длины. Например, если вода поступает из пяти точек, то максимальная горизонтальная состав-

ляющая скорости v_r уменьшается в 10 раз по сравнению с v_r на схеме сосредоточенного поступления воды с одного конца.

Для взвешенных веществ с диаметром частицы 0,01—0,001 мм их гидравлические величины при 10°C соответственно приблизительно равны 0,15—0,0015 или по шкале Сабанина 0,2—0,0011 мм/с, или 13—0,13 м/сут. При глубине воды в бассейне 2 м и скорости фильтрации 1 м/сут получим время осаждения отмеченной мути (без учета влияния горизонтальной составляющей скорости движения воды) порядка 0,15—15 сут. Кроме того, при горизонтальном направлении движения воды следует учитывать вертикальную составляющую (около 0,083—0,05) от горизонтальной составляющей скорости. При длине бассейна 100 м, глубине воды 2 м и скорости инфильтрации 1 м/сут при впуске воды с одного торца бассейна около места впуска получим в итоге вертикальную составляющую скорости движения воды от горизонтальной 4,2—2,5 м/сут.

При таких условиях теоретически около самого места впуска воды в бассейн в осадок попадут только самые крупные фракции мути, и тогда осадок (пленка) по гранулометрическому составу по длине бассейна будет формироваться неравномерно. Это, конечно, теоретические расчеты без детального учета массы осадка, коагуляции и других условий, но принципиально расчеты о неравномерности распределения осадка правильны.

А. А. Кастальский вывел приближенную линейную связь скорости осаждения мути и процента осадка взвешенных частиц. Например, при скорости осаждения 1 мм/с (86,4 м/сут) осаждается 38 % взвешенных частиц, а при скорости осаждения 0,1 мм/с (8 м/сут) — 80 %.

По данным В. А. Клячко и И. Э. Апельцина, при тех же скоростях осаждаются некоагулированных взвешенных частиц 10 и 85 %, что соответствует, очевидно, разным условиям (состав взвешенных частиц, температура, горизонтальная скорость движения воды и др.).

Равномерное распределение осаждения мути возможно радикально улучшить при дождевании (см. рис. 7,б), приняв t_0 примерно 10—20 м. В этом случае получится наиболее равномерная пленка по всей площади бассейна и, следовательно, наиболее равномерная очистка воды при прохождении через пленку. В зимнее время в суровом холодном климате дождевание (с аэрацией) следует заменить другим методом распределения воды, например с помощью сегнерова колеса близ поверхности воды.

Концентрация растворенного кислорода в воде, поступающей в бассейны, обычно близка к полному насыщению. Из рис. 8 видно, что при аэрации (на впуске в бассейн) концентрация кислорода увеличивается на 0,7—3 мг/л, от впуска до другого конца бассейна на 1—2 мг/л, а всего на 2—5 мг/л. Таким образом, вода в бассейне насыщена и даже перенасыщена кислородом, поэтому процессы окисления органического вещества идут довольно энергично.

Микробиологическое очищение идет синхронно с процессами распада и окисления органических соединений.

В водоемах средней европейской части СССР за 48 ч отмирает 60—70 % микробов (зимой меньше). Так как во многих инфильтрационных бассейнах большая часть воды находится свыше 2 сут со значительной концентрацией кислорода, то и отмирание бактерий в бассейне должно быть значительным. Одновременно увеличивается концентрация углекислоты и понижается рН. Развитие водорослей существенно влияет на ряд процессов. В результате фотосинтеза днем при 18—20°C выделяется кислород даже с перенасыщением воды до 14—15 мг/л и более (по данным В. М. Берданова и др.). Под воздействием водорослей, в частности сине-зеленых, улучшается бактериальная очистка. Влияние микроводорослей на улучшение качества воды показано в работах А. В. Долово-Добровольского и других (1960—1975 гг.). Одновременно с отмиранием водорослей возникает дополнительная нагрузка на окисление и может ухудшаться качество воды — появляются неприятные запахи и вкус.

За последние 10—15 лет на некоторых инфильтрационных бассейнах начали высевать камыш-кугу, рогоз широколистный и другие водные растения, чтобы улучшить очистку воды. По данным исследователей ГДР, камыш разрыхляет грунт, увеличивая его фильтрационные свойства в бассейнах, и поглощает хлор, фенол и другие вещества. Исследования фильтрационных бассейнов с камышом ведется в Крифельде, Дрездене. Последние годы в ГДР стали более широко применять травяные бассейны; по эко-

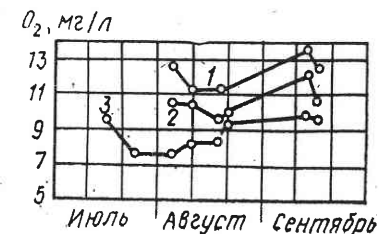


Рис. 8. Изменение концентрации кислорода в воде инфильтрационного бассейна

1 — в торце бассейна; 2 — на впуске в бассейн; 3 — в г. Сейм

номическим показателям они выгоднее бассейнов с песчаным дном.

За рубежом, в основном в Западной Европе, большое внимание уделяется изучению биоценоза в инфильтрационных бассейнах и влиянию его на интенсификацию процессов улучшения качества воды. Ставятся опыты по разведению различных рыб (лινь, окунь, карп и др.) в бассейнах и прудах (Познань в Польше, Висбаден в ФРГ и др.). В ФРГ в Рурском районе на участке Хальтери используются семь инфильтрационных бассейнов общей площадью 7,84 га, занятых камышом (100 стеблей на 1 м²). Скорость инфильтрации без чистки сохраняется постоянной. На контрольных бассейнах производят очистку от ила (пленки) раз в год. За камышом ухаживают вручную, что пока обходится дорого, но метод этот перспективный.

Повышение температуры воды интенсифицирует окисление и ускоряет рост водорослей. Освещенность воды не только определяется сменой дня и ночи, но и зависит от облачности и мутности воды. Увеличение освещенности ускоряет развитие водорослей и вызывает отмирание ряда бактерий.

Следует отметить, что развитие планктона в инфильтрационных бассейнах в различных системах ИВПВ и со смежной времени года идет неодинаково. Например, по данным В. Усонене, в одной из систем ИВПВ в канале от р. Нерис летом число клеток водорослей доходит до десятков млн. клеток/л и даже больше, а зимой уменьшается до 0,2—0,4 млн. клеток/л. После предварительной очистки в сверхскорых фильтрах число клеток водорослей падает в отдельных случаях в 1,3—2,3 раза, а в инфильтрационных бассейнах снова увеличивается.

В инфильтрационных бассейнах с осени и до конца зимы число клеток водорослей уменьшается до 1—10 млн. клеток/л, а с конца зимы и летом увеличивается до десятков млн. клеток/л. При этом диатомовые водоросли зимой составляют 15—50, а летом 65—75 % общего числа всех видов водорослей. Количество сине-зеленых водорослей летом и осенью уменьшается до 2—30 %, а зимой и весной увеличивается примерно до 15—70 %. Эти данные в разные годы могут не совпадать, изменяется и число клеток водорослей.

Распределение микроводорослей (как вероятно и бактерий) в плане и по глубине инфильтрационного бассейна неодинаково и довольно заметно. В той же системе ИВПВ в V бассейне в октябре 1976 г. близ поверхности воды было обнаружено 1,5, а на дне бассейна — 44,9 млн. кле-

ток/л, при этом на дне преобладали диатомовые водоросли (74—81 %). Как по численности, так и по видовому составу наблюдались колебания, в особенности по сезонам.

В р. Арагви, которая подает воду на систему ИВПВ, в июле 1979 г. было отмечено до 1 млн. клеток/л водорослей разного видового состава, а в инфильтрационных бассейнах их количество уменьшилось примерно до 100 тыс. клеток/л. Число бактерий (по общему счету) в реке было около 1,7, в отстойнике — 2,7 и в бассейне 2 млн. клеток/мл. Эти цифры показывают, как отличается планктон в разных условиях, сколь велико может быть количество микроорганизмов в планктоне. Это объясняет существенное влияние его на изменение качества воды. В некоторых водозаборах концентрация растворенного кислорода только во время пребывания воды в бассейне увеличивается на 3 мг/л, что объясняется главным образом жизнедеятельностью фотосинтезирующих микроорганизмов, а применение аэрации повышает концентрацию растворенного кислорода до 6 мг/л. Это заметно влияет на окислительные процессы и изменяет качество воды. Наблюдается также повышение концентрации азота в разных его соединениях, в результате метаболизма и деструкции микроорганизмов. Отмечается снижение концентрации фосфора и ряда других элементов под влиянием развития планктона. В результате деструкции водорослей могут появиться неприятные запахи и привкусы, увеличиться концентрация углекислоты. Следовательно, степень развития микроорганизмов, их численность, видовой состав, а также их жизнедеятельность и отмирание влияют на состав и качество воды. В большинстве случаев качество воды улучшается, но этот вопрос изучен недостаточно.

Процессы очистки при инфильтрации в бассейне в некоторой степени аналогичны очистке в медленных фильтрах. Различия этих процессов в следующем:

фильтрующим материалом в бассейнах служат естественные грунты, реже с подсыпкой сверху песка. При регенерации грунта в бассейнах удаляется пленка и часть закольматированного песка, а в медленных фильтрах весь песок промывается;

инфильтрационные бассейны — сооружения открытого типа, подверженные непосредственному воздействию атмосферных условий, а медленные фильтры часто устраиваются закрытого типа;

инфильтрационные бассейны в системе искусственного восполнения являются предпоследним этапом в улучшении качества воды перед водоносным горизонтом, в то вре-

мя как медленные фильтры — обычно последний этап очистки воды.

При улучшении качества воды в бассейнах необходимо рассматривать инфильтрацию через пленку, через закольматированный слой грунта, а также через зону аэрации до водоносного слоя, так как фильтрация воды и улучшение качества исходной воды в них различны. Обнаружено, что в верхней части пленки (днища) инфильтрационных бассейнов присутствуют живые и мертвые микроорганизмы. Так, в пленке инфильтрационных бассейнов системы ИВПВ в долине р. Арагви на отдельных участках обнаружено бактерий $(5-7) \cdot 10^8$ клеток/см³ по общему счету (по Разумову), из них нитратных 10^2-10^5 и сульфатредуцирующих 10^2-10^5 клеток/см³.

В одной из систем ИВПВ района Прибалтики (по данным В. Усонене, октябрь, 1976 г.) на глубине 7 см от дна бассейна (при концентрации на дне бассейна было водорослей 44,9 млн. клеток/л) находилось 26,9 млн. клеток/л, а на глубине 20 см было 25 тыс. клеток/л, т. е. на глубине всего 20 см задерживается 99,94 % клеток водорослей. По опытам 15 ноября того же года водорослей в бассейне было 16,6 млн. клеток/л (на дне 22,3 млн. клеток/л), а на глубине 20 см — 6 тыс. клеток/л, т. е. задерживалось на глубине 20 см около 99,97 % водорослей. На глубине 20 см преобладали диатомовые мелкие водоросли.

Илистая пленка энергично задерживает кишечную палочку. При сильном загрязнении пленки (коли-индекс $> 20\,000-400\,000$) вымывание чистой водой в лабораторных опытах продолжалось почти 20 сут, пока коли-титр в выходящей воде перестал соответствовать ГОСТ 2874-73.

По данным С. Н. Чекаловой в инфильтрационном бассейне системы ИВПВ Балтэзерс в пленке на глубине 1 см было водорослей около 3 млн. клеток/см³ (3,5 мг/см³), а на глубине 10—15 см их уже уменьшилось до 0,1 млн. клеток/см³ (0,128 мг/см³), т. е. в 30 раз. На глубине 1 см живых клеток было отмечено 95 и на глубине 10—15 см — 60—70 %, т. е. с глубиной сокращается не только количество микроорганизмов, но они и отмирают.

Следовательно, существенную роль при улучшении качества воды играет пленка. При фильтрации через пленку задерживаются взвешенные частицы и большинство микроорганизмов; кроме того, в пленке адсорбируется ряд растворенных веществ и, в частности, токсичных и нежелательных. При инфильтрации из бассейна через пленку и зону аэрации эмульгированные нефтепродукты обычно задерживаются.

По данным Е. И. Моложавой, при незначительной концентрации в воде нефтепродуктов и канцерогенов на уровне ПДК, они частично задерживаются пленкой (остальные проникают под бассейн). Однако в зоне аэрации продолжается процесс химического и биологического разложения органических веществ. В летний период на глубине 0,5—1 м под бассейном могут создаваться благоприятные условия для развития общей микрофлоры, но для фага кишечной палочки и клостридии этого не наблюдается.

По данным Л. А. Христиановой и С. Н. Чекаловой [36], в инфильтрационных бассейнах одной из систем в районе Прибалтики через слой песка 40 см (вероятно, и пленки) поступало в подземные воды 32 % клеток фитопланктона, а в опытной установке другой системы ИВПВ в скважинах водозабора в 30 м от инфильтрационного бассейна было обнаружено 1—3 % клеток водорослей (20—30 клеток/мл) содержания в бассейне. При деструкции микроорганизмов, задерживаемые вещества поступают в водоносный горизонт. Так, в подземные воды системы ИВПВ долины р. Арагви (лето 1979 г.) поступило (по нашим данным) дополнительно $C_{орг}$ в количестве 1,6 мг/л; некоторыми авторами в других местах отмечается значительно большее поступление.

Интересные сведения о влиянии зоны аэрации на очистку воды приведены в работе Г. А. Шина (1970). При продолжительности полива сточными водами на полях орошения в течение семи дней и мощности зоны аэрации 2—3 м бактериальное загрязнение не достигало водоносного горизонта. Выживаемость кишечной палочки при этом была около месяца. При заражении водоносного горизонта кишечной палочкой выживаемость ее была около 3,5 мес. Данные исследований по очистке вод в зоне аэрации, проведенных в США, аналогичны данным Г. А. Шина.

Итак, при наличии пленки и кольматации нижележащих песков происходит значительное улучшение качества воды. Однако по данным Порядина (1971 г.), известны случаи, когда на одном объекте Сибири при подаче мутной воды загрязнения проникли в гравийный слой на глубину 1,6 м. В связи с этим пришлось снять закольматированный слой и насыпать сверху мелкий песок. На другом объекте СССР в первый период работы инфильтрационного канала вода получалась мутноватая (прозрачность 25 см) даже в водозаборных скважинах.

Таким образом, очевидно, что пленка и зона аэрации имеют важное значение для улучшения качества воды,

но более определенно об улучшении качества воды при фильтрации через дно бассейна в зоне аэрации можно судить по опытам в натуре для конкретных условий.

По исследованиям последних лет выявилось влияние микроорганизмов на химический состав подземных вод в системах ИВПВ и в особенности при работе инфильтрационных бассейнов. В одной из систем ИВПВ с инфильтрационными бассейнами в районе Прибалтики НСО_3^- увеличилось с 231 до 261 мг/л, а SO_4^{2-} уменьшилось с 31,4 до 26,2 мг/л, также уменьшилось NH_4^+ с 0,22 до 0,14 мг/л и PO_4^{3-} с 0,05 до 0,025 мг/л. В системе ИВПВ долины р. Арагви $C_{\text{орг}}$ увеличилось с 4,7 до 6,1 мг/л.

По данным В. В. Вуда и Р. Л. Бессетта (1975, США), в системе ИВПВ Луббоке (штат Техас) отмечено увеличение бикарбонатов на 150 и уменьшение сульфатов на 80 мг/л. Это связывают с деятельностью микроорганизмов и, в частности, сульфатредуцирующих бактерий.

Концентрация микроорганизмов в планктоне инфильтрационных бассейнов влияет также в результате уменьшения их расхода. Это отмечает Геферт Кароли (1976 г., Венгрия). По его данным, для рассматриваемого объекта нами вычислено, что влияние микроорганизмов на ослабление фильтрационных свойств пленки бассейнов эквивалентно увеличению мутности на 6 мг/л, что является значительным.

В долине р. Арагви коэффициент фильтрации пленки, по нашим данным и В. Ю. Гегелашвили, в среднем составляет 0,011 м/сут, бактерий в пленке 0,6 млн. клеток/см³ и водорослей 1,5 млн. клеток/л. В пленке же одной из систем ИВПВ Прибалтики эти величины составляют соответственно 0,00056 м/сут (в 20 раз меньше); 1,1 млн. клеток/см³ (в 2 раза больше) и 15 млн. клеток/л (в 10 раз больше). В обоих случаях вода в инфильтрационные бассейны поступала осветленная. Очевидно, что повышать фильтрационные свойства пленки нужно снижением количества клеток микроорганизмов в воде бассейнов. В результате последних наших исследований выявлено, что большое повышение концентрации фильтранктона в инфильтрационных бассейнах снижает коэффициент фильтрации пленки на 1—2 порядка, что отрицательно влияет на расход инфильтрационных бассейнов.

6. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В водоносных горизонтах в ряде случаев может происходить естественное улучшение качества воды. Но такие возможности ограничены, поэтому в соответствующих случаях подземную воду, полученную из водозаборов, необходимо улучшать. Исходная поверхностная вода поступает в водоносный горизонт с ничтожной мутностью (1—3 мг/л) и с температурой, близкой к поверхностным водам. В отдельных случаях допускается небольшое отклонение по качеству воды от требований ГОСТ 2874—73. Кроме того, в течение коротких периодов времени года может быть значительно хуже указанных требований даже по химически вредным компонентам. При длительном поступлении загрязненной воды в водоносный горизонт рассчитывать на надлежащее естественное улучшение ее качества не следует. Рассмотрим возможности улучшения качества воды в водоносном горизонте.

УЛУЧШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСХОДНОЙ ВОДЫ

В зависимости от климатических условий и сезона поверхностная вода имеет температуру от близкой к 0 до +25°C и более. Однако температура воды, поступившей в водоносный горизонт, выравнивается, приближаясь к температуре подземных вод. На рис. 9 показано изменение температуры поверхностных и подземных вод в течение года в системе ИВПВ для водоснабжения г. Висбадена. Поверхностные воды имеют амплитуду колебания температуры около 17°C, а подземные — всего 4°C. На рис. 10 показано изменение температуры воды при фильтрации из озера в водоносные пески в зависимости от расстояния от инфильтрационного бассейна и времени пребывания воды в водоносном горизонте. При начальной температуре 13°C поверхностная вода приобрела температуру подземных вод на расстоянии 215 м от инфильтрационного бассейна через 27 сут пребывания в водоносном горизонте и при начальной температуре 10°C — на расстоянии 90 м через 11 сут.

Таким образом, при искусственном восполнении подземных вод из реки температура поступившей поверхностной воды обычно становится близкой к температуре естественных подземных вод. При значительных колебаниях

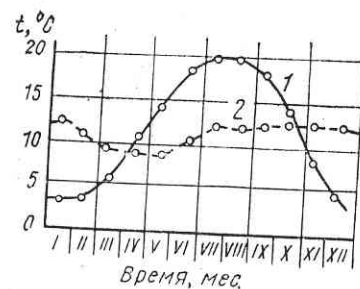


Рис. 9. Изменение температуры воды р. Рейна (1) и искусственно восполняемых подземных вод (2) в системе ИВПВ для водоснабжения г. Висбаден

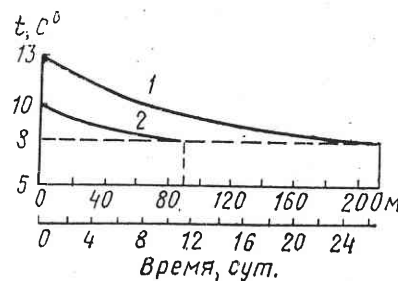


Рис. 10. Изменение температуры воды из озера при фильтрации в среднернстых водоносных песках (по П. И. Богомазову)

При начальной температуре поверхностных вод: 1—13°С; 2—10°С

температуры поверхностных вод (18—25°С) температура восполняемых подземных вод изменяется в пределах 1÷11°С, но чаще 2÷8°С (табл. 4).

Таблица 4. Изменение температуры поверхностных вод при искусственном восполнении подземных вод

Объект	Расстояние от инфильтрационного бассейна, м	Время пребывания в водоносном горизонте, м	Температура, °С	
			поверхностных вод	подземных вод
Ганновер	75—150	—	3—20	5—16
Эссен	50	—	0—25	8—16
Висбаден	230	60—90	0—24	8,5—12,5
Гетеборг (Швеция)	200	90	0—20	8—13
Эссен-Шиленбург (ФРГ)	50	15	0—25	8—16
Гамбург-Курслак (ФРГ)	85	60	0—25	9—10
Ганновер-Риклинген (ФРГ)	100	—	3—20	5—16
Штадтвальд (ФРГ)	200	45	3—23	8—13
Дортмунд (ФРГ)	50	15	0—25	5—16

В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке СССР отмечены случаи, когда на расстоянии 75—100 м от реки температура подземных вод при эксплуатации береговых инфильтрационных водозаборов с небольшой мощностью аллювиальных отложений (до 5—10 м) имела амплитуду колебания в течение года до 18°С. В настоящее время предлагается рассчитывать изменение температуры грунтовых вод по теории тепло-массопереноса. Однако сложность

учета всех необходимых условий пока затрудняет получение надежных теоретических решений. Для приближенных решений их можно применять, но при проектировании новых объектов лучше пользоваться аналогами. Улучшение температуры поверхностных вод при искусственном восполнении важно по гигиеническим требованиям, а также техническим условиям — необходимость подогревать воду зимой для бытового и технического использования, предохранения водопроводных элементов от замерзания, в особенности при сильных морозах. Летом поверхностные воды могут прогреваться до 20°С и более, а искусственно восполняемые воды обычно имеют температуру воздуха, что для питьевых целей более приемлемо.

УЛУЧШЕНИЕ САНИТАРНО-БАКТЕРИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

При фильтрации в водоносных песках может происходить улучшение санитарно-бактериологических показателей в результате отмирания микроорганизмов, а также их задерживание и прилипание под влиянием адгезии. Следует заметить, что может иметь место и обратный процесс — отлипание. П. И. Богомазов (1972) описывает улучшение бактериального состава воды в водоносном горизонте при ИВПВ. По нашим данным, этот водоносный горизонт приурочен к среднернстым (частично крупнозернистым) пескам мощностью около 25 м с коэффициентом фильтрации примерно 30 м/сут и пористостью 0,2. На рис. 11 показано процентное изменение концентрации бактерий при движении воды. Процентная концентрация бактерий быстро снижается по мере удаления от инфильтрационного бассейна, а именно: на расстоянии 20 м примерно через 2 сут она составляет 10 % первоначальной, а на расстоянии 40 м через 5 сут не превышает 5 % и на расстоянии 140 м через 46 сут становится значительно меньше 1 %.

На рис. 12 приведены два случая улучшения окисляемости при движении воды в том же водоносном горизонте (по П. И. Богомазову); при этом отмечены изменения показателя по кишечной палочке. В обоих случаях при начальной окисляемости коли-титр был 0,001, т. е. в 300 000 раз хуже требований для кондиционной питьевой воды; концентрация бактерий при этом была 40 200 клеток/мл, т. е. в 402 раза хуже, чем по верхнему пределу допустимого по ГОСТ 2874—73. Следовательно, вода была

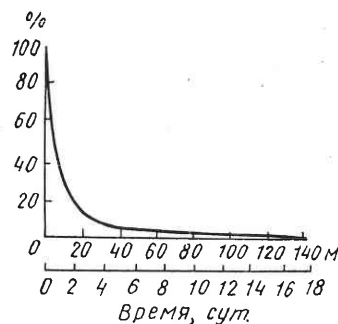


Рис. 11. Снижение концентрации бактерий в воде озера при фильтрации в среднезернистых песках в зависимости от расстояния и продолжительности фильтрации

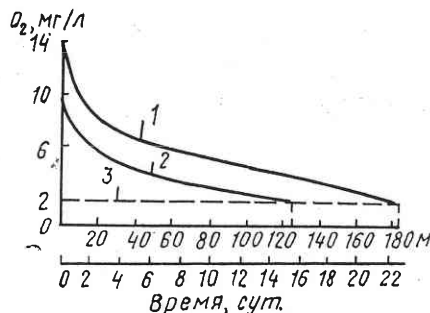


Рис. 12. Снижение окисляемости воды озера при фильтрации в среднезернистых песках

1 — изменение окисляемости при начальной окисляемости 14 O_2 мг/л в зависимости от времени фильтрации и расстояний; 2 — то же, при начальной окисляемости 9 O_2 мг/л; 3 — то же, в естественных условиях

загрязненная. После движения воды в течение 22,5 сут на расстоянии 180 м окисляемость уже была 2 мг O_2 /л, коли-титр — 300, число бактерий всего 2 клеток/мл, т. е. вода по бактериальным показателям улучшилась в 20 000—300 000, стала отличной и по окисляемости.

По А. Е. Орадовской и Е. И. Моложавой [17], из приближенного решения уравнения (1) фильтрации в песках с учетом адгезии микроорганизмов при постоянной входной их концентрации $C_{вх}$ (клеток/л) в исходной воде можно определить расстояние l , на котором задана относительная концентрация микроорганизмов $\bar{C}$, клеток/л, по формуле

$$l = \frac{1}{\beta} \ln \left[1 + \left(\frac{1 - \bar{C}}{\bar{C}} \right) e^{\alpha t} \right], \quad (5)$$

где α и β — параметры адгезии, m^{-1} .

Параметры адгезии α и β определяют по натурным или лабораторным опытам по формулам:

$$\alpha = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{\bar{C}_2 (1 - \bar{C}_1)}{\bar{C}_1 (1 - \bar{C}_2)}, \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{t} \ln \left[1 + \left(\frac{1 + \bar{C}}{\bar{C}} \right) e^{\alpha t} \right], \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\alpha N_0}{C_{вх} v} N, \quad (8)$$

где t_1 и t_2 — время; $\bar{C}$, $\bar{C}_1$ и $\bar{C}_2$ — относительные концентрации микроорганизмов, т. е. $C/C_{вх}$, $C_1/C_{вх}$ и $C_2/C_{вх}$.

Полную емкость адгезии (N_0) микроорганизмов можно определить по формуле

$$N_0 = \frac{\beta}{\alpha} C_{вх} v, \quad (9)$$

где v — скорость фильтрации, м/сут.

В табл. 5 из работы [35] приведены результаты лабораторных определений параметров адгезии α , β , N_0 кишечной палочки при скорости фильтрации воды v в песках с активной пористостью n_a , на расстоянии от места впуска l и входной концентрации зараженности $C_{вх}$.

Таблица 5. Параметры адгезии (адсорбции) кишечной палочки при фильтрации в песках по лабораторным опытам [35]

№ опыта	d_3	l , см	v , м/сут	n_a	$C_{вх}$, клеток/л	α , сут $^{-1}$	β , м $^{-1}$	N_0 , клеток/л
1	0,2	20 40 60	1	0,195	(1,8—2,8) 10^4	0,85	4,26	$1 \cdot 10^6$
2	0,2	24 46 77 90	1,78	0,215	(1,6—9,3) 10^5	0,263	8,70	$3 \cdot 10^7$
3	0,5—1	29 51 75 90	1,78	0,254	(2—9) 10^5	0,205	8,50	$4 \cdot 10^7$

В табл. 5 приведены не все условия, которые могут влиять на параметры адгезии кишечной палочки и, в частности, не даны температура, состав воды и др. Для других микроорганизмов и их сообщества параметры будут иные. Отсюда очевидно, что в природных условиях миграция микроорганизмов будет многообразна. По условиям табл. 5 на расстоянии 11 м от впуска загрязненной воды первоначальная концентрация кишечной палочки снизится через 400 сут, примерно в 10^4 . Такие расчеты, конечно, являются приближенными.

УЛУЧШЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ПУТЕМ СМЕШИВАНИЯ

Состав воды в водоносном горизонте в некоторых случаях можно улучшить смешиванием фильтруемой поверх-

ностной и естественной подземной воды по формуле

$$C_v = (C_{пов}Q_{пов} + C_{под}Q_{под})/Q_v, \quad (10)$$

где C_v , $C_{пов}$ и $C_{под}$ — концентрации вещества в воде водозабора, в поверхностной и естественной подземной воде; Q_v , $Q_{пов}$ и $Q_{под}$ — расходы водозабора, поверхностной и естественной подземной воды.

Расход Q_v должен быть равен сумме расходов $Q_{пов}$ и $Q_{под}$, а $C_v \gg \text{ПДК}$. Кроме того, уравнение действительно без учета химических и физико-химических процессов, в которых могут участвовать рассматриваемые компоненты. Следовательно, можно улучшить качество поверхностной и подземной воды при условии, что минерализация и концентрация нежелательных и токсичных компонентов будут незначительно превышать ПДК.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Если при взаимодействии загрязнителя поверхностной воды с подземной водой или водоносными породами образуется нерастворимое соединение, то качество воды может улучшаться. В системе ИВПВ этот процесс идет непрерывно, но при условии допустимой концентрации загрязнителя, которая определяется химическими и физико-химическими расчетами.

БАРЬЕРНАЯ РОЛЬ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

При кратковременных (залповых) химических загрязнениях поверхностных вод, когда загрязняющие вещества сорбируются водоносными породами, можно использовать барьерные свойства водоносного горизонта. Это достаточно ясно видно из данных лабораторного эксперимента [4], показанного на рис. 13. Исходная концентрация хлорного сульфанола (ПАВ) была принята постоянной $C_{вх} = 1$ мг/л; скорость фильтрации воды была также постоянной $v = 1$ м/сут. После пакетного запуска ПАВ продолжительностью 1, 2 и 3 ч дистиллированная вода подавалась с той же скоростью движения. Из этого опыта видно, что при одной и той же продолжительности запуска загрязнителя $t_n = 2$ ч (опыт б) при увеличении пути максимум загрязнения наступает позднее и его концентрация снижается. При одном и том же расстоянии (опыт а) максимум загрязнения по концентрации повышается вместе с продолжительностью запуска загрязнений. В обоих опытах в связи с промывкой чистой водой наступает десорбция и концен-

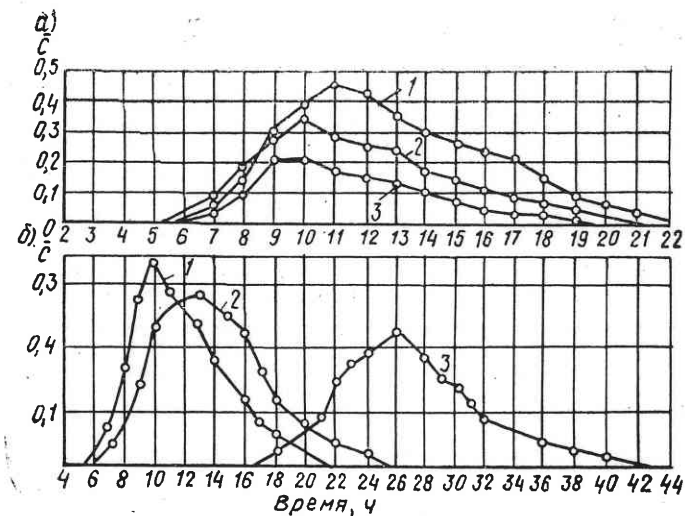


Рис. 13. Схема изменения $\bar{C} = C/C_{вх}$ при пакетном запуске ПАВ (хлорного сульфанола) в водоносные пески при $C_{исх} = 1$ мг/л, $d_s = 1$ мм и $v_{ср} = 1$ м/сут

а — при $x = \text{const } 0,4$ м: 1 — при $t_n = 3$ ч; 2 — при $t_n = 2$ ч и 3 — при $t_n = 1$ ч; б — при $t_n = \text{const } 2$ ч: 1 — при $x = 0,4$ м; 2 — при $x = 0,5$ м; 3 — при $x = 1$ м

трация загрязнения снижается, стремясь к нулю; растекание — уменьшение загрязнения более продолжительный процесс, чем накопление максимума концентрации загрязнителя в воде.

На основании результатов лабораторных опытов, приведенных в работе [4], видно, что для ряда веществ при продолжительном поступлении загрязнителя сорбционная емкость в песках довольно быстро исчерпывается и загрязнитель исходной концентрации может поступить из водоносного горизонта в водозабор, но после прекращения поступления загрязнителя концентрация его в водозаборе постепенно снижается. Некоторые компоненты, как, например, NaCl, в большинстве водоносных песков не сорбируются. При постоянном поступлении растворимых сорбируемых загрязнителей концентрацией больше ПДК водоносные породы, как правило, не могут быть защитой, так как их сорбционная емкость ограничена. Расчет защиты от кратковременного загрязнения при ИВПВ теоретически можно вести по схеме, приведенной в работе [9]. Время движения воды от инфильтрационного сооружения (бассейна) к водозабору $t_6 = (L_6 n_a)/v_f$, где L_6 — расстояние от инфильтрационного сооружения (бассейна) до водозабора; v_f — скорость фильтрации; n_a — активная пористость по-

род водоносного слоя; при этом $t_{\max} = t_0 + 0,5t_n$, где t_n — период кратковременного загрязнения.

Принимается условие $t_{\max}/t_n > 15$, тогда максимальную относительную концентрацию $\bar{C}_{\max}$ взвешенных частиц, поступающих в водозабор, можно вычислить по формуле (считая дисперсию вдоль одномерного потока) [29]:

$$\bar{C}_{\max} = 0,5 \left[\operatorname{erf} \frac{v_1 t_n}{4 \sqrt{D_1 \left(\frac{L_0}{v_1} - 0,5 t_n \right)}} + \operatorname{erf} \frac{v_1 t_n}{4 \sqrt{k D_1 \left(\frac{L_0}{v_1} - 0,5 t_n \right)}} \right], \quad (11)$$

где $\operatorname{erf}(z)$ — обозначение интеграла вероятности (функция Крампа — табулирована): $\operatorname{erf}(z) = 1 - \operatorname{erfc}(z)$; $\bar{C}_{\max} = C_{\max}/C_{\text{вх}}$; $C_{\max}$ — максимальная концентрация взвешенных частиц на выходе в водозабор; $v_1 = v_{\text{ф}} \beta / [n_a (1 + \beta)]$, где β — коэффициент распределения взвешенных частиц в равновесных условиях; $\beta = C_0/N_0$, где C_0 и N_0 — соответственно предельные равновесные концентрации в растворе и сорбенте, отнесенные к единице порового пространства; D_1 и D_2 — коэффициенты дисперсии при сорбции и десорбции, определяемые по формуле $D\beta/[n_a (1 + \beta)]$, где D — коэффициент дисперсии; $k = D_2/D_1$.

Определение расстояния L_0 при допустимой концентрации взвешенных частиц $C_{\max}$ в водозаборе можно получить из указанного выше уравнения путем подбора и, в частности, построением графиков $C_{\max} = f(L_0)$. На действующих сооружениях при $C_{\text{вх}}$, t_n , L_0 и параметрах, входящих в формулу (11), определяется концентрация загрязнителя $C_{\max}$ (в водозаборе).

Расчет $C_{\max}$ (при сорбировании) можно вести по графику на рис. 14:

$$\alpha = v_{\text{ф}} t_n \beta / [n_a \bar{L}_0 (1 + \beta)]; \quad (12)$$

$$\delta = D / (v_{\text{ф}} \bar{L}_0). \quad (13)$$

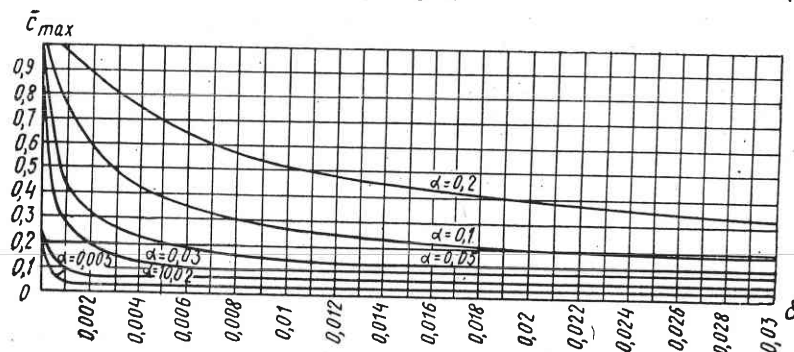


Рис. 14. График функции $C_{\max} = f(\alpha, \delta)$

При проектировании и создании зон санитарной охраны следует учитывать возможность кратковременного залпового загрязнения воды, поступающей в системы ИВПВ, а также рассчитывать улучшение качества воды при кратковременном загрязнении. В ГДР в расчетах при залповых загрязнениях рекомендуется использовать более простые связи, чем в формуле (11), и, по-видимому, за счет осреднения некоторых параметров (D_1 , k и v_1).

Пример 2. Определить допустимый максимум ухудшения качества воды $C_{\max}$ водозабора при залповом загрязнении. Исходные данные примем следующие: поверхностная вода для ИВПВ изредка содержит вредный компонент с концентрацией 2 мг/л при ПДК=0,8 мг/л; продолжительность загрязнения 25 сут (после этого периода вода уже не содержит вредного компонента); $v_{\text{ф}} = 0,5$ м/сут; $n_a = 0,35$; $D = 0,024$ м/сут; $k = 1,5$; $\beta = 0,1$; $L_0 = 100$ м.

Расчет. Имеем $t_{\max} = (100 \cdot 0,35) / 0,5 + 0,5 \cdot 25 = 82,5$ сут. Тогда $t_{\max}/t_n$ получим $3,5 < 15$. Поэтому результаты расчетов оказываются приближенными. Определяем $\bar{C}_{\max}$ по формуле (11):

$$v_1 = \frac{0,5 \cdot 0,1}{0,35 (1 + 0,1)} = 0,13; \quad D_1 = \frac{0,24 \cdot 0,1}{0,35 (1 + 0,1)} = 0,0062;$$

$$\bar{C}_{\max} = 0,5 \left[\operatorname{erf} \frac{0,13 \cdot 25}{4 \sqrt{0,0062 \left(\frac{100}{0,13} + 0,5 \cdot 25 \right)}} + 0,4 \operatorname{erf} \frac{0,13 \cdot 25}{4 \sqrt{1,5 \cdot 0,0062 \left(\frac{100}{0,13} - 0,5 \cdot 25 \right)}} \right] =$$

$$= 0,5 (\operatorname{erf} \cdot 0,37 + \operatorname{erf} \cdot 0,31) = 0,5 (0,4 + 0,34) = 0,37;$$

$$C_{\max} = 2 \cdot 0,37 = 0,74 \text{ мг/л} < \text{ПДК (0,8 мг/л)}.$$

Полученный результат проверим по графику на рис. 14.

$$\alpha = \frac{0,5 \cdot 25 \cdot 0,1}{0,35 \cdot 100 (1 + 0,1)} = 0,032; \quad \delta = \frac{0,024}{0,5 \cdot 100} = 0,00048.$$

По графику $\bar{C}_{\max} = 0,36$, тогда

$$C_{\max} = 2 \cdot 0,36 = 0,72 \text{ мг/л} < \text{ПДК (0,8 мг/л)}.$$

Расхождение по двум методам получалось менее 3%. Следует иметь в виду, что график на рис. 14 составлен без учета разницы между D_1 и D_2 , которая в данном примере (см. рис. 14) дала бы $C_{\max}$ не 0,36, а примерно 0,4 и разница для $C_{\max}$ равнялась бы 7,8%. Следует учесть, что теоретические расчеты, приведенные выше, являются приближенными. Для их уточнения исходные параметры необходимо получить из натуральных наблюдений, а это для вновь проектируемых систем ИВПВ мало реально. В связи с этим кроме данных теоретических расчетов следует иметь исходные данные и параметры по аналогам.

Глава VI. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ БАССЕЙНОВ

1. КОНСТРУКЦИИ

В системах искусственного восполнения подземных вод, используемых для нужд хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения, наибольшее распространение получили инфильтрационные бассейны [26].

Различают инфильтрационные бассейны капитального и облегченного типов [4, 10, 3, 26, 28]. Бассейн капитального типа представляет собой искусственное углубление в виде котлована и траншеи, откосы которого тщательно крепятся, а дно планируется под горизонтальную плоскость и при наличии гравийно-галечниковых отложений покрывается слоем песка. Бассейн облегченного типа сооружают в виде котлованов, дамб и насыпей с небольшой, как правило, выемкой грунта. Дно таких бассейнов не планируют так тщательно, как для бассейнов капитального типа, а откосы не крепят или выполняют облегченное крепление. Особой разновидностью бассейнов являются бассейны, сооружаемые в гравийно-галечниковых отложениях (с гравийной загрузкой дна или без нее), которые могут обладать конструктивными особенностями бассейнов как капитального, так и облегченного типов. Последнее время получают распространение также «травяные» бассейны (на их откосах и днищах культивируются специальные виды водостойких трав).

Инфильтрационные бассейны имеют, как правило, прямоугольную форму в плане и трапецеидальное (реже прямоугольное), поперечное и продольное сечения. Размеры бассейнов в плане должны отвечать эксплуатационным требованиям и соответствовать протяженности капитальных сооружений. На крупных установках искусственного восполнения устраивают бассейны шириной по дну 15—30 м и длиной 200—400 м. Глубина бассейна зависит от гидрогеологических, топографических и климатических условий; чаще ее назначают 1,5—3 м и реже 3—4 м и более. При слабопроницаемых покровных отложениях днища бассейнов врезаются в хорошо фильтрующие породы на глубину не менее 0,3 м. Общая глубина бассейна от днища до верха откоса должна превышать глубину его наполнения не менее чем на 0,5 м.

Обвалование бассейнов выполняют грунтом, извлеченным из выемки при их строительстве. На затопляемых в период паводков участках высоту обвалования принима-

ют такой, чтобы в бассейн через дамбы не проникали паводковые воды. Заложение откосов бассейнов принимают в зависимости от свойств грунтов. Один из торцовых откосов бассейна должен быть более пологим, чем остальные. Заложение его определяется возможностью съездов и въездов машин и механизмов, используемых для декоматации днища. Иногда съезды и въезды предусматривают на продольных откосах бассейна.

Откосы бассейнов капитального типа крепят бетонными или железобетонными плитами (рис. 15). Чтобы обеспечить устойчивость крепления у подошвы откоса, устраивают бордюр. Под плитами укладывают дренажный слой гравия, предохраняющий крепления от повреждений в зим-

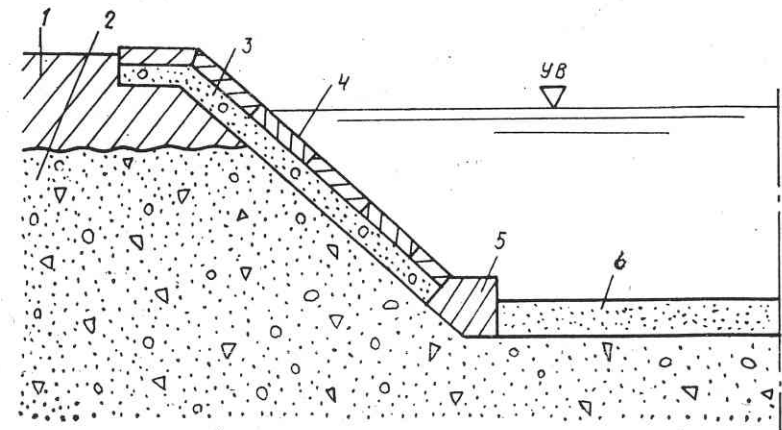


Рис. 15. Бассейн капитального типа (поперечный разрез)

1 — покровные отложения; 2 — грунт водонесущей толщи; 3 — дренажный слой; 4 — железобетонные плиты; 5 — бордюр; 6 — песчаная загрузка

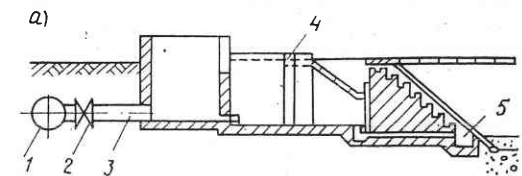


Рис. 16. Схемы подачи воды на инфильтрацию

а — аэрационный каскад; б — разбрызгивающие сопла; 1 — главный распределительный трубопровод; 2 — задвижка; 3 — подводящий трубопровод; 4 — водослив; 5 — водобойный колодец за каскадом; 6 — распределительный трубопровод; 7 — разводящие трубопроводы; 8 — разбрызгивающие сопла

ний период. Бассейны облегченного типа крепят посевом трав, укаткой, укладкой щебня и гравия.

При сооружении бассейнов в гравийно-галечниковых отложениях часто предусматривают песчаную загрузку дна. Толщина песчаной загрузки составляет 0,3—0,5 м. Механический состав песка назначают в зависимости от качества подаваемой в бассейн воды. Песчаную загрузку дна инфильтрационных бассейнов следует производить при необходимости увеличить зону аэрации. Исходя из наших исследований над гравийной засыпкой следует укладывать слой песчаной засыпки. При гравийно-галечниковых водоносных отложениях у дна бассейна с примесью песка и мелкозема, а также при гравийной засыпке с песком и мелкоземом песчаную подсыпку можно не делать.

Для воды со значительной концентрацией крупных взвешенных частиц, что имеет место обычно при работе бассейнов на неотстойной речной воде, целесообразно использовать средне- и крупнозернистые пески с преобладающим размером частиц 0,25—0,5 мм; для воды с малой концентрацией той же крупности частиц (что наблюдается при предварительном отстаивании или фильтровании речной воды) следует применять чистые мелкозернистые пески с преобладающим размером частиц 0,1—0,25 мм.

Бассейны с гравийной загрузкой дна устраивают в тех случаях, когда площадь, отводимая под систему ИВПВ, ограничена и необходимо создать условия для больших скоростей инфильтрации. Такие бассейны, а также бассейны в гравийно-галечниковых отложениях без загрузки подсыпки на дно, несмотря на глубокое проникание в эти отложения загрязнений, можно в течение многих лет эксплуатировать на водозаборах промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения, а также в качестве временных сооружений на водозаборах хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Вода в инфильтрационные бассейны может подаваться с помощью следующих устройств: одного или двух выпусков воды, размещенных в середине продольного откоса бассейна или в его торцовых откосах; аэрационных каскадов, расположенных на одном или обоих продольных откосах бассейна (рис. 16,а); разбрызгивающих сопел, равномерно распределенных по площади дна бассейна (рис. 16,б). Во втором и третьем случаях достигается хорошее насыщение воды воздухом, поступающим на инфильтрацию.

На бассейнах следует предусматривать входные узлы, позволяющие регулировать и измерять подаваемые в них

расходы, предупреждать их переполнение, а при необходимости и предотвращать размыв дна бассейна.

Входной узел инфильтрационного бассейна должен иметь устройство, при котором можно выполнять следующие операции:

в любой момент работы бассейна измерять подаваемый в него расход;

перед заполнением бассейна до предельной отметки устанавливать заданный расход воды или изменять этот расход в соответствии с заданным графиком работы бассейна; автоматически поддерживать заполнение бассейна водой до предельного уровня.

Конструктивные особенности входных узлов должны соответствовать:

типу распределительной сети, которая может выполняться закрытой (из проложенных в земле трубопроводов) и открытой (из каналов);

климатическим условиям (в районах с длительными периодами отрицательных температур все элементы входных узлов должны быть защищены от промерзания);

особенностям устройства бассейнов;

назначенному режиму подачи воды в бассейн.

При конструировании входных узлов необходимо учитывать максимальный расход бассейна, возможную амплитуду колебания расходов, допустимую величину потери напора при движении воды через арматуру узла.

Возможные конструктивные схемы регуляционно-измерительных устройств входных узлов инфильтрационных бассейнов, получающих воду из закрытой и открытой распределительных сетей, приведены в работе [4].

На практике часто целесообразно отказаться от устройства специальных входных узлов. Подачу воды в бассейн и ее уровень можно регулировать задвижками, а расход определять с помощью концевой диафрагмы, смонтированной в торце трубопровода, подводящего воду к бассейну. Напор перед диафрагмой измеряется через отверстие в стенке трубопровода [8].

Возможная конструкция измерительного устройства показана на рис. 17. Измерительное устройство крепится к снабженной вентилем (или краном) отводной трубке, приваренной к стенке трубопровода, и состоит из двух частей: стационарной (фасонный патрубок) и переносной. Последняя включает в себя водомерную трубку, закрепленную в сальнике с помощью зажимной втулки и накидной гайки, вкладыша и накидной муфты. Переносной частью измерительного устройства можно пользоваться для

последовательного измерения расходов, подаваемых во все бассейны системы искусственного пополнения.

При расчете концевой диафрагмы выбирают предельный перепад давлений в сечениях до диафрагмы и после нее (здесь давление равно атмосферному), определяют диаметр отверстия и вычисляют потери напора h при пропуске различных расходов Q . График $Q=f(h)$ позволяет определять величину подаваемого в бассейны по трубопроводу расхода по высоте поднятия воды в измерительном устройстве.

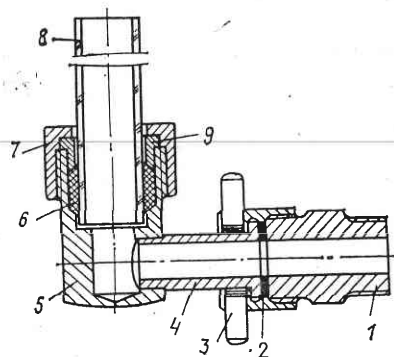


Рис. 17. Устройство для измерения напора воды перед диафрагмой

1 — фасонный патрубок; 2 — резиновая прокладка; 3 — накидная муфта; 4 — вкладыш; 5 — корпус сальника; 6 — хлопчатобумажное уплотнение; 7 — накидная гайка; 8 — стеклянная трубка; 9 — зажимная втулка

Концевые диафрагмы можно рекомендовать не только для вновь строящихся систем искусственного восполнения, но и для действующих, поскольку их устройство не связано со сколь-либо значительными дополнительными затратами на строительство камер и ко-

лодцев и длительным отключением бассейна от распределительной сети. Концевыми диафрагмами оборудованы все 17 инфильтрационных бассейнов одного водозабора в Прибалтике.

2. РЕЖИМ РАБОТЫ

Инфильтрационные бассейны работают с разными режимами. На крупных установках искусственного восполнения в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения вода в бассейны подается часто по сложному графику.

Рабочий цикл бассейна со сложным режимом имеет пять периодов $t_1—t_5$ (рис. 18,а). После очередной чистки в бассейны часто подают относительно малые удельные (отнесенные к единице площади инфильтрации) расходы q_1 , составляющие всего лишь $1/5—1/4$ часть максимального q_2 . Это делается для того, чтобы в первый период работы бассейна, когда дно его еще не закольматировано, избежать проникания в водоносный пласт большого количества загрязнений. Сниженные против максимального, но постоянно увеличивающиеся расходы подаются в течение 10—15, а иногда и 25—30 сут. Просачиваясь в грунт, вода остав-

ляет содержащиеся в ней взвешенные частицы в тонком слое песка, находящемся непосредственно под поверхностью инфильтрации, и в илстой пленке, образующейся над этой поверхностью. Это приводит к росту гидравлических сопротивлений и к непрерывному подъему уровня воды в бассейне. Время подъема до предельного уровня зависит главным образом от величины подаваемого расхода воды, от ее мутности и от глубины возможного наполнения бассейна.

Предельная глубина воды в бассейне H_M определяется его конструкцией, начальный и максимальный расходы устанавливаются правилами эксплуатации. Для бассейнов, сооруженных в среднерзистых и крупнозернистых песках, характеризующихся коэффициентами фильтрации от 10—20 до 60—80 м/сут, максимальные удельные расходы q (т. е. скорости инфильтрации) обычно лежат в пределах 1÷3 м/сут. Для бассейнов, сооруженных в мелкозернистых песках и супесях, величина максимальных скоростей инфильтрации может быть уменьшена до 0,5 м/сут. В гравийно-галечниковых отложениях максимальные скорости инфильтрации могут достигать значительно больших величин (до 20—30 м/сут и более). При этом очень строго проверяется очищающая способность бассейна.

После подъема воды до предельного уровня в течение более или менее продолжительного времени бассейн работает при постоянной глубине наполнения, а скорость инфильтрации уменьшается. Когда она достигает недопустимо малой с практической точки зрения величины, подача воды в бассейн прекращается и начинается сработка уровня воды в нем. При этом падают скорости инфильтрации

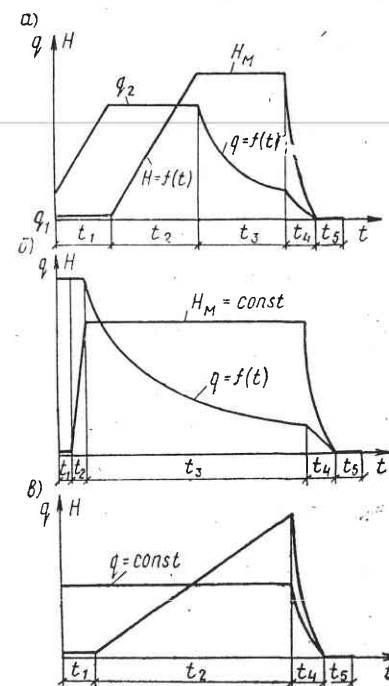


Рис. 18. Режимы работы инфильтрационных бассейнов

а — сложный; б — упрощенный при $H=\text{const}$; в — упрощенный при $q=\text{const}$; t_1 — период затопления дна бассейна тонким слоем; t_2 — период наполнения бассейна до предельного уровня при постоянном расходе; t_3 — период поддержания уровня постоянным; t_4 — период сработки уровня; t_5 — период чистки

из бассейна. После опорожнения бассейн чистят. Инфильтрационные бассейны часто эксплуатируют также на упрощенных режимах $H = \text{const}$ (быстрого наполнения) или $q = \text{const}$. При первом режиме (рис. 18,б) сразу после чистки в бассейн подаются повышенные расходы воды и быстро достигается предельный уровень. Работа на режиме «быстрого наполнения» может оказаться целесообразной при наличии на дне бассейна мелкозернистых песков или супесей (грунтов, заведомо неспособных колыматироваться на сколь-либо значительную глубину), а также в тех случаях, когда пуск бассейна приурочен ко времени наступления отрицательных температур. Второй режим характеризуется постоянным расходом воды в бассейне в течение всего рабочего периода. Работа на втором режиме (рис. 18,в) сопровождается медленным и равномерным подъемом уровня воды в бассейне. К концу рабочего периода этот уровень достигает допустимого для бассейна максимума. Режим $q = \text{const}$ может оказаться целесообразным при чистках бассейна, производимых один-два раза в году, и при отсутствии в пределах обогащаемого водоносного пласта регулирующей, доступной для использования емкости. Эксплуатация бассейнов, работающих на режиме $q = \text{const}$, наиболее проста и встречается часто.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА

При проектировании бассейна его расход может прогнозироваться по аналогии с сооружениями действующих установок искусственного восполнения и путем расчетов.

Первый способ требует использования данных, полученных при длительной эксплуатации установки, сходной с вновь проектируемой по факторам, влияющим на величину расхода бассейна, а также по качеству воды источника восполнения, по общей схеме предварительной подготовки воды, по загрузке днища сооружения, по свойствам подстилающего его грунта и т. д. Этот способ может оказаться наиболее рациональным, если вновь проектируемая установка искусственного восполнения находится в районе действующей или проектируется расширение последней.

Расчеты расхода бассейнов выполняют по зависимостям, полученным на основе решения соответствующих фильтрационных задач. Для расчета необходимо иметь данные о свойствах воды, намечаемой к использованию (мутность, гранулометрический состав взвешенных частиц), составе и проницаемости грунтов в основании инфильтрационных бассейнов, их конструктивных особенностях и заданном режиме эксплуатации.

До стадии ТЭД* необходимые для расчета параметры можно определять по обобщенным результатам эксплуатации инфильтрационных бассейнов, на которых производили ранее наблюдения и исследования. На последующих стадиях, как правило, следует предусматривать проведение специальных полевых (на опытных бассейнах) и лабораторных (на фильтрационных колоннах) работ [4, 10]. При проектировании особо ответственных сооружений на водозаборах с большим расходом экспериментальные исследования в полевых условиях производят в течение продолжительного периода (как правило, не менее года).

Основная задача расчета инфильтрационных бассейнов — определить: полный Q или удельный q фильтрационный расход, который будет поступать в водоносный пласт во все периоды работы бассейна, продолжительность каждого периода и общее количество воды, которое отдаст бассейн за фильтроцикл W (отдача бассейна).

Для любого периода работы инфильтрационного бассейна справедливо следующее балансовое уравнение

$$Q_0 = Q + Q_{\text{вм}}, \quad (14)$$

где Q_0 — расход воды, подаваемый в бассейн; Q — фильтрационный расход из бассейна; $Q_{\text{вм}}$ — расход на заполнение (опорожнение) бассейна.

Расчеты и опыт эксплуатации бассейнов показывают, что, как правило, $Q \gg Q_{\text{вм}}$, поэтому расходом, идущим на наполнение бассейна, можно пренебречь. Такой подход целесообразен, так как при этом не изменяется общая отдача бассейна и средняя скорость инфильтрации за фильтроцикл, а техника расчета значительно упрощается.

Время опорожнения бассейна может быть задано. Обычно оно не превышает 5—10 сут. Если сработка уровня воды в бассейне идет недопустимо медленно, то производят принудительное опорожнение бассейна.

При расчете расхода инфильтрационных бассейнов необходимо учитывать рост сопротивления грунтов вследствие выпадения из воды содержащихся в ней механических взвешенных частиц, а также микроорганизмов. Грунты основания бассейнов в большинстве случаев представлены песками, а в гравийно-галечниковых отложениях обычно устраивают песчаную загрузку (это обеспечивает более надежную очистку воды, что особенно важно для водозаборов хозяйственно-питьевого водоснабжения). В связи с

* По схеме обоснования изысканий для проектирования.

этим рост гидравлического сопротивления обуславливается в основном образованием на поверхности дна бассейна (или загрузки) слоя илстой пленки (осадка). Процессы собственного кольтматажа, т. е. отложения взвешенных частиц в порах грунта песчаного основания, обычно происходят лишь в первый, сравнительно короткий период, продолжительность которого оценивается по так называемой грязеёмкости грунта N . Только в отдельных случаях (например, в гравелисто-галечниковых грунтах с крупным заполнителем и при гравийной загрузке дна) кольтматаж может иметь место в течение более или менее длительного времени.

Учитывая изложенное выше, расчеты фильтрации из бассейнов в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения, как правило, следует производить по схеме пленочной фильтрации. Динамику формирования илстой пленки на дне (и откосах) бассейнов можно выразить соотношением из работы [4]

$$d\delta = Mqdt/\gamma_{ск}, \quad (15)$$

где δ — толщина пленки; M — концентрация взвешенных частиц в воде (ее мутность); $\gamma_{ск}$ — объемная масса скелета пленки; q — скорость инфильтрации (расход, отнесенный к единице площади); t — время образования пленки толщиной δ .

Из соотношения получим скорость инфильтрации

$$q = k_n H / \delta. \quad (16)$$

Коэффициент фильтрации пленки k_n и напор H , под которым происходит инфильтрация, стали основополагающими для получения расчетных зависимостей, приведенных в табл. 6.

Выводы этих зависимостей приведены в работах [4, 10]. Формулы табл. 6 были получены из предпосылок и допущений, подробно проанализированных в работе [4], а именно:

инфильтрационный расход (или скорость инфильтрации) в первый период постоянен или меняется по линейному закону;

к концу первого периода (затопления дна бассейна тонким слоем) полностью завершается процесс кольтматации грунта в основании бассейна;

фильтрационное сопротивление закольтматированного песка невелико по сравнению с фильтрационным сопротивлением илстой пленки;

фильтрация из бассейна при наличии на его дне пленки происходит при неполном насыщении пор закольтматированного песка водой;

Таблица 6. Расчетные зависимости для инфильтрационных бассейнов

Периоды	Режим эксплуатации и особенности конструкции	Формулы	Обозначения
I $0 < t < t_1$	$q_1 = q_2$ или $q = 0,5(q_1 + q_2)$ $H = 0$	$t_1 = 2N / [(q_1 + q_2) M];$ $W_1 = t_1 F [(q_1 + q_2) / 2]$	F — площадь дна бассейна
	$q_2 = \text{const}$ Откосы непроницаемые $H = f(t)$	$t_2 = H_m A / (q_2^2 M);$ $W_2 = q_2 F t_2$	$A = k_n \gamma_{ск}$
II $t_1 \leq t \leq t_1 + t_2$	$Q_2 = q_2 F = \text{const}$	$t_2 = \frac{[B^2 + 3B \sqrt{1 + m^2} H_m + 2(1 + m^2) H_m^2] A H_m}{q_2^2 B^2 M}$	B — ширина бассейна по дну, m — заложение откосов
	Откосы проницаемые $H = f(t)$	W_2 определяется по зависимости (20)	

Периоды	Режим эксплуатации и особенности конструкции	Формулы	Обозначения
III	$q_3 = f(t)$ $H = H_M = \text{const}$ Откосы непроницаемые	$q_3 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{q_2^2} + \frac{2M(t-t_1-t_2)}{AH_M}}}; \quad (22)$ $t_3 = t_n - (t_1 + t_2 + t_4 + t_5); \quad (23)$ $W_3 = \frac{E}{q_2} \left[\sqrt{\frac{A}{H_M M} \left(\frac{H_M}{M} + 2q_2^2 t_3 \right)} - \frac{A}{H_M M} \right] \quad (24)$	—
$t_1 + t_2 \leq t \leq t_1 + t_2 + t_3$	$q_3 = f(t)$ $H = H_M = \text{const}$ Откосы проницаемые	$q_3^0 = 0,67q^3; \quad (25)$ $q_3 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{q_2^{*2}} + \frac{2M(t-t_1-t_2)}{AH_M}}}; \quad (26)$ $t_3 \text{ определяется по зависимости (23)}$ $W_3 = \frac{(B + 1,34 \sqrt{1 + m^2 H_M}) L_6}{q_2^*} \times \left[\sqrt{\frac{A}{H_M M} \left(\frac{H_M}{M} + 2q_2^{*2} t_3 \right)} - \frac{A}{H_M M} \right] \quad (27)$	q_3^0 — средний удельный расход через откос $q_2^* = q_2 B / (B + 2 \sqrt{1 + m^2 H_M})$, где L_6 — длина бассейна по дну

напор, под которым происходит инфильтрация, равен глубине воды в бассейне (давление под закольматированным слоем песка равно атмосферному);

грязеемкость грунтов откосов бассейна мала, а толщина пленки на фильтрующем откосе во второй период изменяется по линейному закону от величины, определяющей толщину пленки на дне бассейна (у основания откоса), до нуля (у уреза воды);

пленка несжимаема и ее фильтрационные свойства и объемная масса скелета остаются неизменными во времени.

Последняя предпосылка принята для упрощения расчетов. В действительности фильтрационные свойства пленки в течение рабочего цикла могут меняться за счет разрушения пленки возрастающим давлением воды, происходящими в ней биологическими процессами, сжимаемостью пленки. В настоящее время существуют методики, позволяющие оценить расход инфильтрационных бассейнов, исходя из предположения о сжимаемости осадка (пленки). Такие методики приведены, например, в работах [10, 33].

Охарактеризуем теперь метод расчета инфильтрационных бассейнов, основанный на использовании расчетных зависимостей, приведенных в табл. 6. Общая продолжительность фильтроцикла t_n назначается с учетом числа намечаемых чисток бассейна в году, которые обуславливаются климатическими условиями района, качеством воды, подаваемой на пополнение, режимом работы бассейна, требуемой средней за фильтроцикл скоростью инфильтрации и т. д. и могут уточняться при расчетах. Продолжительность сработки t_4 , как уже отмечалось, не превышает 5—10 сут, а t_5 при чистке вручную можно принимать равной 10—20 сут и механизмами 5 сут.

Для отечественных установок характерно, что бассейны используются обычно в качестве источника пополнения речных вод без предварительной подготовки воды или с предшествующим инфильтрации освещением ее в открытых отстойниках, а фильтрующая способность бассейнов восстанавливается один раз в год после весеннего паводка. На период паводка подача поверхностной воды на инфильтрацию часто прекращается из-за большой концентрации в ней взвешенных частиц, а также потому, что необходимый расход можно получить за счет инфильтрации из реки или за счет накопленных емкостных запасов.

Общую продолжительность периода t , в течение которого воду на инфильтрацию не подают, следует назначать в зависимости от продолжительности паводка, устанавливаемого по данным гидрологических ежегодников (она в

абсолютном большинстве случаев превышает время сработки уровня воды в бассейне t_4 и чистки t_5), а в случае необходимости проводить дополнительные исследования. В таких случаях в расчетных зависимостях $t_4 + t_5$ заменяется величиной t' , которая часто с достаточной для практических целей точностью может быть принята равной 1—1,5 мес.

Чтобы определить расчетную мутность M , гидрометрические посты обязаны провести специальные исследования. На начальных стадиях проектирования допустимо пользоваться данными гидрологических ежегодников. Если проектом предусматривается предварительная подготовка воды, подаваемой на инфильтрацию, то расчетная мутность назначается с учетом уменьшения мутности речной воды на очистных сооружениях. Для бассейнов с незакрепленными откосами, сложенными суглинистыми и глинистыми грунтами, следует также учитывать возможность кратковременных повышений мутности в периоды ливневых дождей (в первом приближении в 5—6 раз). Прежде чем использовать расчетные зависимости (см. табл. 6), следует определить параметры N , k_n , $\gamma_{ск}$. При расчете бассейнов, работающих на сложном режиме или на режиме $H = \text{const}$, исходными должны быть q_1 и q_2 (их значения назначаются в соответствии с данными, приведенными в главе V, п. 2). По формулам табл. 6 вычисляют t_1 , W_1 , t_2 и W_2 . Затем по зависимости (23) определяют продолжительность третьего периода, по формулам (22) или (25) и (26) — значения расходов в различные моменты времени, а по формулам (24) или (27) устанавливают величину отдачи в этот период. Для бассейнов, работающих на упрощенном режиме $q = \text{const}$, задача сводится к решению системы из трех уравнений. Одно из соотношений

$$t_1 + t_2 = t_{ц} - (t_4 + t_5), \quad (28)$$

второе — формула (17) при $q_1 = q_2$, а третье — выражение (19) или (21).

Формулы для определения q_2 имеют следующий вид: для бассейнов с непроницаемыми откосами

$$q_2 = \frac{N + \sqrt{N^2 + 4MH_M A (t_{ц} - t_4 - t_5)}}{2M (t_{ц} - t_4 - t_5)}; \quad (29)$$

для бассейнов с проницаемыми откосами

$$q_2 = \frac{NB + \sqrt{N^2 B^2 + 4M (t_{ц} - t_4 - t_5) [B^2 + 3BH_M \sqrt{1 + m^2} + 2H_M^2 (1 + m^2)] H_M A}}{2MB (t_{ц} - t_4 - t_5)} \rightarrow \quad (30)$$

По результатам расчетов инфильтрационных бассейнов составляют графики скорости инфильтрации $q = f(t)$ для всех периодов работы бассейна.

Средняя скорость инфильтрации за фильтроцикл определяется из соотношения

$$q_{ср} = W / (F_6 t_{ц}), \quad (31)$$

где $W = \Sigma W_i$ — общая отдача бассейна за фильтроцикл; F_6 — площадь инфильтрации бассейна.

Пример 3. Искусственное пополнение намечено осуществлять из инфильтрационных бассейнов с непроницаемыми откосами, работающих на сложном режиме.

Дано: $F = 3000 \text{ м}^2$; $M = 20 \text{ мг/л}$; $q_1 = 0,4 \text{ м/сут}$; $q_2 = 2 \text{ м/сут}$; $H_M = 2 \text{ м}$; $\kappa_n = 0,001 \text{ м/сут}$; $\gamma_{ск} = 0,8 \text{ г/см}^3$; $N = 0,5 \text{ кг/м}^2$; $t_{ц} = 183 \text{ сут}$ ($t_5 = 15 \text{ сут}$).

(Чистку предполагается производить вручную).

Требуется определить продолжительность каждого периода работы бассейна, общую отдачу бассейна за фильтроцикл, среднюю скорость инфильтрации и построить графики $q = f(t)$ и $H = f(t)$.

Расчет.

$$A = k_n \gamma_{ск} = 0,001 \cdot 0,8 \cdot 10^3 = 0,8 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сут.}$$

Применив формулы (17) и (18), найдем

$$t_1 = \frac{2 \cdot 0,5}{(0,4 + 2) \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 21 \text{ сут};$$

$$W_1 = \frac{3000 (0,4 + 2)}{2} \cdot 21 = 7,5 \cdot 10^4 \text{ м}^3.$$

Используя соотношения (19) и (20), получим

$$t_2 = \frac{2 \cdot 0,8}{2^2 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 20 \text{ сут};$$

$$W_2 = 2 \cdot 3000 \cdot 20 = 12 \cdot 10^4 \text{ м}^3.$$

Приняв $t_4 = 10 \text{ сут}$ и $t_5 = 15 \text{ сут}$, по зависимости (23) определим

$$t_3 = 183 - (21 + 20 + 10 + 15) = 112 \text{ сут},$$

а по формуле (24) найдем значение параметра

$$W_3 = \frac{3000}{2} \left[\sqrt{\frac{2 \cdot 0,8}{20 \cdot 10^{-3}} \left(2 \frac{0,8}{20 \cdot 10^{-3}} + 2,2^2 \cdot 112 \right)} - 2 \frac{0,8}{20 \cdot 10^{-3}} \right] = 30,5 \cdot 10^4 \text{ м}^3.$$

Для отдельных моментов ($t_{3,n}$) третьего периода t_3 работы бассейна q имеет следующие значения:

$t_{3,n}$, сут	0	20	50	100	112
q , м/сут	2	1,16	0,8	0,6	0,57

Общий объем воды, инфильтруемый за фильтроцикл, равен

$$W = 7,5 \cdot 10^4 + 12 \cdot 10^4 + 30,5 \cdot 10^4 = 50 \cdot 10^4 \text{ м}^3.$$

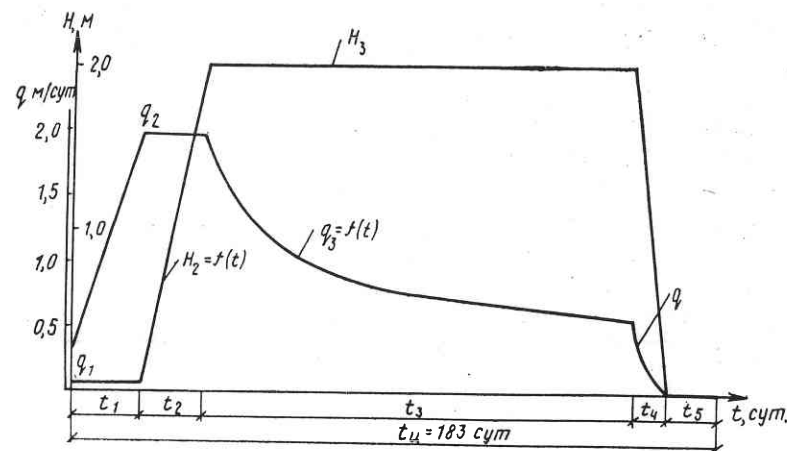


Рис. 19. Кривые $q=f(t)$ и $H=f(t)$

По формуле (31) средняя скорость инфильтрации из бассейна составляет

$$q_{\text{ср}} = \frac{50 \cdot 10^4}{3000 \cdot 183} = 0,91 \text{ м/сут.}$$

Расчетные графики $q=f(t)$ и $H=f(t)$ приведены на рис. 19.

Приведенные выше зависимости, как уже отмечалось, применимы, если преобладает пленочная фильтрация из бассейнов. На основе данных лабораторных и полевых исследований установлено, что в крупнозернистых песках наблюдается проникание взвешенных частиц до глубины 5—10, а в гравийно-галечниковых породах до 30—50 см и более. При кольтматации коэффициент фильтрации грунтов может изменяться в десятки раз. Отсюда следует, что при расчете инфильтрационных бассейнов во многих случаях необходимо учитывать кольтматацию подстилающих их грунтов. Важно также исследовать динамику уменьшения проницаемости пористой среды в процессе кольтматации, увеличение потерь напора в закольтматированном слое грунта, изменение мощности этого слоя и продолжительность самого процесса*.

В общем случае фильтрация малоconцентрированных смесей (именно такой смесью является речная вода) через пористые среды сопровождается непрерывными процессами прилипания и отрыва частиц с переходом в протекающую воду.

* Коммунар Г. М., Боголюбов К. С. Некоторые особенности расчета инфильтрационных бассейнов в условиях кольтматации и заиления. Научные исследования в области инженерной гидрогеологии. — Науч. тр. / ВОДГЕО, 1979.

Если предположить, что интенсивность задерживания частиц пропорциональна произведению емкости поглощения взвешенных частиц на их концентрацию в воде, а скорость отрыва частиц от поверхности среды определяется уравнением первого порядка относительно концентрации отложившихся взвешенных частиц, то правомерно следующее уравнение кинетики:

$$\partial b / \partial t = \gamma_k (N_0 - b) c - \beta b, \quad (32)$$

где N_0 — предельная емкость поглощения грунта; c и b — концентрация взвешенных частиц в жидкой (объем частиц в единице объема жидкости) и твердой (объем частиц в единице объема среды) фазах; γ_k — константа скорости осаждения взвешенных частиц; β — константа скорости отрыва частиц от поверхности среды.

Применительно к работе инфильтрационных бассейнов допустимо пренебречь отрывом ранее осевших частиц ($\beta=0$) и изменением емкости поглощения ($b \leq N_0$). В этом случае процесс кольтматации будет протекать по линейному уравнению кинетики первого порядка (необратимое осаждение взвешенных частиц);

$$\partial b / \partial t = \gamma_k N_0 c. \quad (33)$$

Чтобы установить закономерность распределения взвешенных частиц по пути движения воды, уравнение (33) необходимо дополнить балансовым уравнением (скорость фильтрации q и пористость n_0 принимаются постоянными):

$$\frac{\partial b}{\partial t} + q \frac{\partial c}{\partial x} + n_0 \frac{\partial c}{\partial t} = 0, \quad (34)$$

и отыскать решение системы уравнений (33), (34) при следующих условиях:

$$\begin{aligned} c(x, t) = b(x, t) = 0 & \text{ при } t \leq \frac{n_0 x}{q}; \\ c(x, t) = c_0 & \text{ при } x = 0. \end{aligned} \quad (35)$$

Нетрудно показать, что функции $c(x, t)$ и $b(x, t)$ определяются из уравнений вида:

$$c(x, t) = c_0 e^{-\frac{N_0 \gamma_k}{q} x}; \quad (36)$$

$$b(x, t) = N_0 \gamma_k c_0 t e^{-\frac{N_0 \gamma_k}{q} x}.$$

Как следует из формулы (36), концентрация взвешенных частиц, отлагающихся в порах, увеличивается пропорционально концентрации взвешенных частиц, находящихся

в воде, и времени работы бассейна. В большей степени кольматации подвержены верхние слои грунта. С глубиной концентрация отложений уменьшается, что хорошо согласуется с данными полевых и лабораторных наблюдений. Рост гидравлического сопротивления на участке зоны кольматажа может быть определен из уравнения

$$\Delta H_k = q \int_0^{l(t)} \frac{dx}{k(x, t)}, \quad (37)$$

где $l(t)$ — подвижная граница зоны кольматажа; $k(x, t)$ — коэффициент фильтрации в зоне закольматированного слоя.

Экспериментами подтверждено, что в диапазоне $b/n_0 \leq 0,4$ изменение фильтрационных свойств грунта за счет отложения в нем взвешенных частиц может быть выражено соотношением

$$k(x, t) = k_0 \left(1 - \frac{2b(x, t)}{n_0} \right), \quad (38)$$

где k_0 — начальный коэффициент фильтрации.

Для определения размеров зоны кольматажа примем, что ее подвижная граница контролируется изменением коэффициента фильтрации m , %, за счет отложения взвешенных частиц. Тогда из соотношения (38) следует, что $b_3 = 0,5 \frac{m}{100} n_0$, а используя уравнение (36), найдем

$$l(t) = \frac{q}{N_0 \gamma_k} \ln \frac{N_0 \gamma_k c_0 t}{b_3}, \quad (39)$$

где b_3 — удельный объем отложений, соответствующий m процентов измененного коэффициента фильтрации.

Интегрируя уравнение (37) с учетом формул (36), (38) и (39), получим выражение, определяющее рост гидравлического сопротивления в зоне кольматируемого грунта

$$\Delta H_k = \frac{q^2}{k_0 N_0 \gamma_k} \ln \frac{(n_0 - 2b_3) N_0 \gamma_k c_0 t}{(n_0 - 2N_0 \gamma_k c_0 t) b_3}. \quad (40)$$

Ко времени t_1 в сечении $x=0$ (поверхность дна бассейна) размеры пор грунта станут соизмеримыми или меньшими размера взвешенных частиц. Обозначим соответствующую концентрацию взвешенных частиц в сечении $x=0$ через b_0 . Тогда из выражения (36) получим время

$$t_1 = b_0 / (N_0 \gamma_k c_0). \quad (41)$$

Величина b_0 должна определяться на основе эксперимента.

С момента t_1 начинается процесс фильтрации с образованием на дне бассейна илистой пленки. Гидравлическое сопротивление (потери напора) ΔH_k преодолевается подъемом уровня воды в бассейне. Неизвестные параметры в формуле (40) определяются экспериментально.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Практически пользоваться формулами и соотношениями, приведенными в табл. 6, можно, если известны фактические значения входящих в них параметров: N , k_p и $\gamma_{ск}$ (последние два параметра заменяются обычно их произведением A).

Грязеемкость N характеризует способность песка площадь взвешенные частицы из фильтрующей через него воды и численно равна массе взвешенных частиц, отложившихся в порах грунта к началу образования илистой пленки, отнесенной к единице площади поверхности инфильтрации. Единицей физической величины грязеемкости является $кг/м^2$. Величина грязеемкости зависит от свойств песка и механического состава взвешенных частиц, а также от величины мутности воды, подаваемой на инфильтрацию, и скорости движения последней.

Параметр N можно определять двумя методами: с помощью приближенной эмпирической зависимости, устанавливающей связь параметров взвешенных частиц со свойствами песка, подстилающего дно бассейна (или песка загрузки); экспериментально — путем проведения исследований в опытно-производственных бассейнах или фильтрационных приборах.

При определении грязеемкости до стадии ТЭД можно использовать график (рис. 20), устанавливающий связь между параметром N и эффективным диаметром песка $d_{эф}$ [6]. Грязеемкость N можно определять следующим образом: исследовать непосредственно кольматируемый песок; применить уравнение баланса взвешенных частиц; оценить продолжительность кольматации. Нахождение параметра N в результате исследования кольматируемого песка детально описано в работе [6].

Определим параметр N из уравнения баланса взвешенных частиц, поступающих в бассейн с непроницаемыми откосами:

$$N = (MW - F \bar{\gamma}_{ск} \bar{\delta}) / F, \quad (42)$$

где $\bar{\gamma}_{ск}$ и $\bar{\delta}$ — значения объемной массы скелета пленки и ее толщины, осредненные по площади инфильтрации.

Рис. 20. Зависимость грязеемкости песков N от крупности их частиц $d_{эф}$

1 — бассейны и фильтрационные приборы Магала; 2 — бассейны Балтэзерс; 3 — бассейн Бигашиво; 4 — медленный фильтр

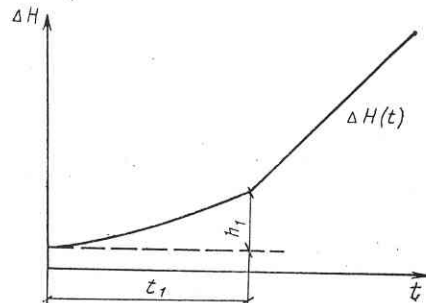
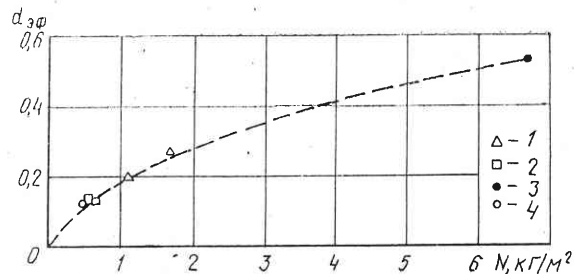


Рис. 21. График изменения во времени потерь напора ΔH в закольматированном слое песка и пленке

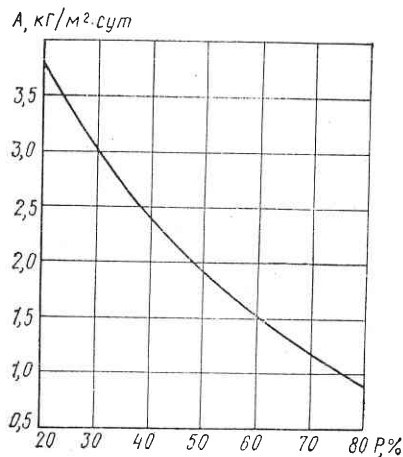


Рис. 22. Зависимость обобщенного параметра A k_n $\gamma_{ск}$ от процентного P (по массе) содержания мелкопылеватых и глинистых фракций в воде, подаваемой на инфильтрацию

Соотношение (42) следует применять при обработке данных, относящихся к любому моменту пленочной фильтрации из бассейна с условием, что величина δ может быть замерена с относительной погрешностью 10—15% (δ должна составлять при этом не менее 0,5 см). Чтобы подсчитать параметр N , необходимо определить величины M , W , $\gamma_{ск}$ и δ . Среднюю мутность в период между пуском бассейна в работу и расчетным временем определяют не реже 2—3 раз в неделю. Величина W контролируется с помощью водометров с суммирующими устройствами. Ее можно также установить на основе систематического замера поступающих в бассейны расходов воды. Для этого целесообразно использовать диафрагмы различных конструкций, водосливы, а также результаты наблюдений за работой уровня воды в бассейне.

Достоинством этого метода является то, что можно получить осредненные значения N для большой площади.

Соотношение (42) можно использовать и при обработке данных, получаемых на фильтрационных приборах.

Зная продолжительность кольматации t_1 , определим значение грязеемкости из соотношения

$$N = q_2 M t_1. \quad (43)$$

Формула (43) действительна для случая $q = q_2 = \text{const}$ (рис. 18, в). Для сложного режима вместо q надо принимать $0,5(q_1 + q_2)$ и для режима $H = \text{const}$ — соответствующее q .

Продолжительность кольматации устанавливается в результате анализа графика изменения во времени потерь напора ΔH (фиксируются на фильтрационном приборе, описанном в работе [4]) в кольматируемом слое песка и пленке.

Принципиальная схема определения t_1 показана на рис. 21. График $\Delta H(t)$ построен по результатам исследований, свидетельствующих о том, что характер кривой отложения взвешенных частиц в порах песка и образования на его поверхности пленки достаточно резко изменяется на границе раздела периодов отложения. Первый период характеризуется более медленным ростом величины ΔH . Значение h_1 показывает потери напора, вызванные кольматацией песка к началу образования пленки. Следует отметить, что переход от одного периода к другому может быть выражен и не столь резко, как это показано на рис. 21.

Параметр A определяется тремя способами:

использованием эмпирических кривых, устанавливающих связь k_n и $\gamma_{ск}$ (или A) со свойствами воды, поступающей на инфильтрацию;

проведением исследований на опытном бассейне, инфильтрометре или фильтрационном приборе с использованием зависимостей (табл. 7), полученных из расчетных формул (см. табл. 6), решением обратной задачи относительно параметра A ;

непосредственным определением величин k_n и $\gamma_{ск}$ при обследовании бассейна после его опорожнения или в период эксплуатации.

Первый способ применяют до стадии ТЭД. При этом параметр A определяют по графику, устанавливающему зависимость этого параметра от концентрации в воде, подаваемой на инфильтрацию, глинистых и мелкопылеватых частиц p , %, (рис. 22) [7].

Второй способ является более надежным, так как дает возможность получить обобщенное значение A , осредненное по всей площади инфильтрации. Если производствен-

Таблица 7. Формулы для определения параметра A

Период работы бассейна. Особенности конструкции откосов	Зависимости
II период ($q_2 = \text{const}$): непроницаемые	$A = \frac{q_2^2 (t_{n+1} - t_n)}{H_{n+1} - H_n} M \quad (44)$
проницаемые	$A = \frac{q_2^2 B^2 (t_{n+1} - t_n) M}{B^2 (H_{n+1} - H_n) + 3B \sqrt{1 + m^2} (H_{n+1}^2 - H_n^2) + 2(1 + m^2)(H_{n+1}^3 - H_n^3)} \rightarrow \quad (45)$
III период ($H_m = \text{const}$): непроницаемые	$A = \frac{2 (t_{n+1} - t_n) q_n^2 q_{n+1}^2}{H_m (q_n^2 - q_{n+1}^2)} M \quad (46)$
проницаемые	Для определения A используется формула (46), где $q_n = Q_n / [(B + 1,34 \sqrt{1 + m^2} H_m) L_6]$; $q_{n+1} = Q_{n+1} / [(B + 1,34 \sqrt{1 + m^2} H_m) L_6]$ (47)

ные бассейны предполагается эксплуатировать на режиме $q = \text{const}$, то параметр A следует определять по зависимости (44) или (45), а на режиме $H = \text{const}$ — по зависимости (46). Если же бассейны намечается эксплуатировать по сложному графику, параметр A необходимо оценить по результатам исследований как во втором, так и в третьем периоде. При небольших расхождениях между вычисленными значениями A в качестве расчетного принимается среднее; в противном случае параметр A следует вычислять для каждого периода.

При исследованиях, которые могут быть сравнительно непродолжительными (в пределах 1—3 мес), замеряют значения полных расходов Q_n и Q_{n+1} , подаваемых в бассейн, или глубин воды в бассейне H_n и H_{n+1} в течение времени t_n и t_{n+1} , а также определяют среднее значение мутности за время $t_{n+1} - t_n$. По полным расходам вычисляют удельные расходы.

Во время наблюдений на опытном бассейне необходимо фиксировать уровень грунтовых вод под днищем бассейна (чтобы установить наличие или отсутствие подтопления)

и температуру воды в нем. При подпортом режиме фильтрации вместо H_{n+1} , H_n и H_m в расчетные зависимости должна быть введена разность отметок уровня воды в бассейне и в щелевом пьезометре со щелью, размещенной непосредственно под закольматированным слоем песка [4].

Следует отметить, что определения k_n и $\gamma_{ск}$ после опорожнения бассейна (или во время его работы) оказываются достоверными. Параметр $\gamma_{ск}$ определяют в лабораторных условиях по общеизвестной методике. Анализируются пробы пленки с ненарушенной структурой, отобранные со дна (или откосов) бассейна. Величину k_n определяют с помощью фильтромеров [4]. Прибор позволяет получить значение фильтрационного сопротивления пленки $A_0 = \delta/k_n$ и при известном δ величину k_n . Величины k_n и $\gamma_{ск}$ определяют по нескольким (3—5) поперечникам при трех точках замера в каждом. На откосе бассейна параметр k_n определяют фильтромером со скошенной нижней коробкой прибора.

При расчетах бассейнов, сооружаемых в гравийно-галечниковых грунтах с загрузкой или без нее, параметр $N_{0\gamma_k}$, входящий в формулу (40), можно вычислить непосредственно из этой формулы, определяя два момента времени — t_n и t_{n+1} и потери напора ΔH_{k1} и ΔH_{k2} на опытном инфильтрационном бассейне или фильтрационном приборе. Параметр $N_{0\gamma_k}$ находится подбором из соотношения

$$\Delta H_{k2} - \Delta H_{k1} = \frac{q^2}{k_0 N_{0\gamma_k}} \ln \frac{(n_0 - 2N_{0\gamma_k} c_0 t_n) t_{n+1}}{(n_0 - 2N_{0\gamma_k} c_0 t_{n+1}) t_n} \quad (48)$$

5. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСХОДА

Для восстановления расхода инфильтрационных бассейнов закольматированный слой грунта и пленка периодически регенерируются. Необходимая частота, способы и приемы регенерации зависят от типа бассейна, режима его работы, гранулометрического состава пород, подстилающих днище сооружений, качества воды, подаваемой на пополнение, климатических и гидрогеологических условий.

Фильтрующая способность бассейнов восстанавливается с их предварительным опоражниванием (I группа) и без опоражнения (II группа). В первом случае для восстановления фильтрующей способности бассейнов применяют следующие способы: используют естественные факторы (ветер, солнце, воздух, т. е. регенерацию без удаления пленки), производят рыхление вспашкой и боронованием; снимают верхний заиленный слой и пленку вручную скребками, удаляют из бассейна снятую со дна массу ло-

патами и транспортерами. Снимают закольматированный слой и пленку механизмами (бульдозером, скрепером, экскаватором и т. д.). При перечисленных способах регенерации инфильтрационные сооружения во время чисток не работают.

Способ естественной регенерации применяют часто для бассейнов сезонного действия в грунтах с малой проницаемостью, а также для травяных бассейнов. При непрерывно действующих бассейнах для применения естественной регенерации необходимы условия, обеспечивающие быстрое опорожнение бассейнов, интенсивную минерализацию пленки и загрязнений, скопившихся в закольматированном слое, и возможность развеивания ветром глинистых и пылеватых частиц. Область применения этого простейшего способа ограничена, и эффект регенерации, как правило, неполный.

Регенерацию поверхности инфильтрации вспашкой, рыхлением и боронованием используют в бассейнах, имеющих на дне слабопроницаемый грунт или почву, и малую глубину. К достоинствам способа можно отнести сравнительную простоту процесса чистки бассейна, а к недостаткам — сопутствующую ему небольшую продолжительность фильтроцикла и сравнительно небольшие среднегодовые скорости инфильтрации.

При ручной чистке (для I группы способов) снимается наиболее загрязненный слой песка толщиной 1,5—3 см вместе с пленкой. Если чистят один раз в год, то загрязненный песок сгребают в ряды и удаляют с помощью транспортера за пределы сооружения, где его пропускают через пескомойки для повторного использования или выбрасывают на свалку. Ручная чистка пока значительно распространена при эксплуатации бассейнов капитального типа, сооружаемых в песках или с песчаной загрузкой дна. Вручную приходится чистить и бассейны с бетонными вертикальными откосами. Достоинством способа является тщательность чистки, а недостатками — значительная трудоемкость, сравнительно большая продолжительность чистки и зависимость ее от погодных условий.

Механизмами, как правило, чистят бассейны облегченного типа. Достоинство такой чистки — незначительная ее продолжительность, а недостатки — нерегулярность толщины снимаемого слоя; пленка и кольматант перемешиваются с чистым песком, удаляются значительные объемы чистого песка. Экскаваторами (или другими средствами механизации) можно полностью удалять закольматированный слой со дна бассейнов с гравийной загрузкой.

Механизмы для чистки инфильтрационных сооружений должны отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать регулировку толщины снимаемого загрязненного слоя грунта;

- иметь транспортирующий орган, позволяющий перемещать снятую массу грунта за пределы сооружения;

- обеспечивать минимальное давление на грунт с тем, чтобы после прохождения механизма по фильтрующей поверхности грунт не уплотнялся;

- не допускать перемешивания чистого грунта с загрязненным;

- быть транспортабельными, маневренными и проходимыми.

Используемые в отечественной практике машины и механизмы обладают перечисленными свойствами не в полной мере. В настоящее время в АКХ им. К. Д. Памфилова МЖКХ РСФСР заканчивается разработка более совершенных механизмов.

Ко II группе регенерации относятся гидравлические способы чистки — пропуск повышенных расходов, использование земснарядов и установок с высоконапорными струями [4]. Существенными недостатками большинства гидравлических способов регенерации являются отсутствие контроля за качеством чистки, необходимость непрерывно отводить промывочную воду, ограничивать размеры сооружения, неизбежность выноса некоторого количества песка за пределы инфильтрационного сооружения и трудности при перемещении агрегатов с объекта на объект.

К способам восстановления фильтрующей способности инфильтрационных бассейнов без предварительного опорожнения можно отнести рыхление пленки в период работы бассейнов, а также разведение в них специальных растений и пород рыб, способствующих непрерывному рыхлению фильтрующей поверхности и освобождению бассейна от веществ, ускоряющих процессы кольматации и заиливания. Этот способ сравнительно легко осуществим. Однако еще нет достаточных данных о его эффективности.

Глава VII. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОДОЗАБОРОВ В СИСТЕМЕ ИВПВ I ТИПА

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основными показателями, определяющими эффективность искусственного восполнения запасов подземных вод, можно принять следующие:

дебит водозаборного сооружения и понижения уровня подземных вод в условиях искусственного восполнения; гидродинамический КПД инфильтрационных сооружений;

гидродинамический коэффициент искусственного восполнения подземных вод.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНИЖЕНИЙ УРОВНЯ ВОДЫ И РАСХОДА ВОДОЗАБОРА

Расчет взаимодействия инфильтрационных и водозаборных сооружений целесообразно проводить с использованием метода суперпозиции (наложения течений). При этом общее понижение уровня подземных вод S в водозаборах системы искусственного восполнения, а также во всех других точках водоносного пласта в зоне влияния водозаборов определяется по следующим зависимостям:

для напорного пласта

$$S = S_b - S_6; \quad (49)$$

для безнапорного пласта

$$S = h_e - \sqrt{h_e^2 - (S_b - S_6)(2h_e - S_b + S_6)}, \quad (50)$$

где S_b — понижение уровня под влиянием эксплуатации водозабора, определяемое без учета искусственного восполнения; S_6 — повышение уровня подземных вод за счет искусственного восполнения, находится без учета водозаборов; h_e — первоначальная мощность безнапорного потока.

Использование метода суперпозиции в данном случае возможно потому, что как водозаборные, так и инфильтрационные сооружения практически работают в режиме заданного расхода (условие II рода). Если же инфильтрационные бассейны эксплуатируются в условиях подпертой, напорной фильтрации (условие I рода), когда их дно при эксплуатации подтапливается, то метод суперпозиции неприменим. В этом случае следует использовать специальные методы расчета, в частности моделирование.

Понижения уровня подземных вод под влиянием водозаборов S_b можно оценивать по обычной методике расчета водозаборных сооружений без искусственного восполнения подземных вод. Эта методика изложена во многих руководствах [3, 30, 31 и т. д.].

В самом общем виде понижение уровня под влиянием водоотбора может быть записано:

для напорного потока

$$S_b = Q_b R_b / 4\pi k m; \quad (51)$$

для безнапорного потока

$$S_b = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q_b}{2\pi k} R_b}, \quad (52)$$

где Q_b — расход водозабора; k — коэффициент фильтрации водоносных пород; m — мощность водоносного горизонта; R_b — гидравлическое сопротивление пласта в условиях эксплуатации водозабора при заданном расходе.

Если водозабор представлен линейным рядом скважин, расположенных параллельно реке (рис. 23), соответствующие расчетные сопротивления (R_b — в точке M и R_{b0} — у водозабора) при большой протяженности водозабора принимают вид:

$$R_b = 2\pi [(L_b - x)/l_b]; \quad (53)$$

$$R_{b0} = 2\pi \frac{L_b}{l_b} + \frac{2}{n} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}, \quad (54)$$

где $2l_b$ — длина водозабора; L_b — расстояние от реки до водозабора; n — количество скважин водозабора; 2σ — расстояние между скважинами.

Аналогичным образом можно рассчитать повышение уровня подземных вод за счет искусственного восполнения. В общем случае расход инфильтрационных сооружений периодически изменяется во времени из-за кольматации дна бассейнов. Однако в большинстве случаев представляется возможным в практических расчетах не учитывать эти изменения и принимать расход инфильтрации из искусственных сооружений по восполнению постоянным. Это обусловлено тем, что на практике обычно используется большое число и их чистка производится не однове-

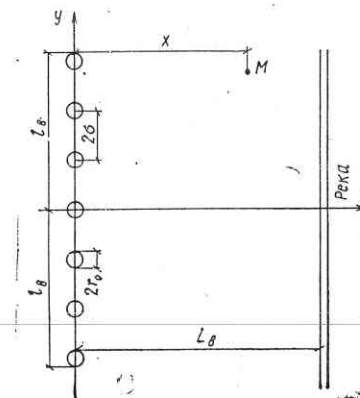


Рис. 23. Схема к расчету линейного водозабора у реки

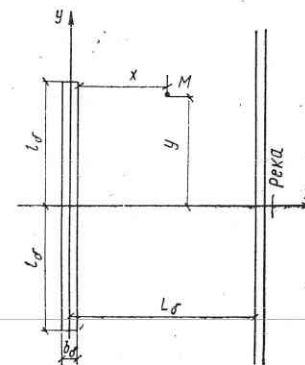


Рис. 24. Схема к расчету протяженной системы бассейнов (канала) у реки

менно. В результате общий суммарный расход из инфильтрационных сооружений остается более или менее постоянным, хотя инфильтрационный расход из каждого отдельного бассейна может существенно изменяться в течение рабочего фильтрационного цикла эксплуатации сооружений.

В общем виде расчетные зависимости для определения повышений уровня S_0 можно представить следующим образом:

для напорного пласта

$$S_0 = Q_0 R_0 / 4\pi km; \quad (55)$$

для безнапорного потока

$$S_0 = \sqrt{\frac{Q_0}{2\pi k} R_0 - h_e^2} - h_e, \quad (56)$$

где Q_0 — средний расход воды, подаваемой на восполнение; R_0 — гидравлическое сопротивление пласта при действии бассейнов с постоянным расходом.

Для численного определения функции R_0 могут быть использованы гидродинамические решения для водозаборных сооружений: площадок, контурных систем и т. д.

Например, для инфильтрационных каналов или системы прямолинейно расположенных бассейнов, ориентированных параллельно реке и имеющих большую протяженность ($l_0 \gg L_0$), сопротивление R_0 выражается следующим образом (рис. 24):

$$R_0 = 2\pi [(L_0 - x)/l_0], \quad (57)$$

где L_0 — расстояние от бассейнов до реки; $2l_0$ — протяженность системы восполнения вдоль реки.

Более подробно решения различных схем приведены в работе [28].

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КПД ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

КПД инфильтрационных сооружений η_i является одним из основных показателей, определяющих гидродинамическую эффективность системы искусственного восполнения подземных вод. Физически коэффициент η_i представляет отношение расхода воды ΔQ , дополнительно поступающей в водозаборное сооружение при работе инфильтрационных бассейнов, к общему среднему расходу подаваемой в них воды Q_0 , т. е.

$$\eta_i = \Delta Q / Q_0. \quad (58)$$

Численно коэффициент η_i определяется, исходя из следующих соображений. Общее понижение уровня подзем-

ных вод на водозаборе при его эксплуатации в условиях восполнения, как уже отмечалось, можно представить для напорных вод так:

$$S_0 = \frac{Q_0}{4\pi km} R_{00} - \frac{Q_0}{4\pi km} R_0. \quad (59)$$

Решая уравнение (59) относительно расхода Q_0 , получим

$$Q_0 = \frac{4\pi km S_0}{R_{00}} + Q_0 \frac{R_0}{R_{00}}. \quad (60)$$

В левой части равенства (60) — полный расход водозабора с учетом восполнения подземных вод. Первый член в правой части характеризует расход водозаборного сооружения без восполнения, а второй — определяет дополнительный прирост дебита водозабора за счет мероприятий по искусственному восполнению подземных вод:

$$\Delta Q = Q_0 (R_0 / R_{00}). \quad (61)$$

Из формулы (61) следует, что увеличение расхода водозабора при восполнении не равно расходу воды, подаваемой в инфильтрационные сооружения Q_0 , а составляет лишь часть его, определяемую соотношением фильтрационных сопротивлений R_0 и R_{00} или гидродинамическим КПД:

$$\eta_i = R_0 / R_{00}. \quad (62)$$

Соотношение (62) численно определяет коэффициент η_i . Из выражения (62) видно, что гидродинамический КПД зависит не только от размеров и расположения инфильтрационных бассейнов (сопротивление R_0), но также и от типа и размещения водозаборных сооружений (сопротивление R_{00}).

В частности, если водозабор подземных вод представляет собой линейный ряд скважин, расположенных вблизи реки (см. рис. 23), а инфильтрационные бассейны размещаются параллельно водозабору (см. рис. 24), то формула (62) приобретает вид

$$\eta_i = L_0 \left[\left(L_0 + \frac{\sigma}{n} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0} \right) \right]. \quad (63)$$

Следует отметить, что гидродинамический КПД η_i не всегда характеризует долю инфильтрационных вод, поступающих к скважинам водозабора. Например, при расположении бассейнов искусственного восполнения ниже по потоку подземных вод от водозабора поверхностные воды, инфильтрующиеся из бассейнов, вообще могут не достигать водозабора. Тем не менее КПД таких сооружений в соответствии с формулой (62) не будет равен нулю. Поло-

жительная роль инфильтрационных сооружений в этом случае будет проявляться в подпруживании естественного потока подземных вод, в результате чего водозабором будет перехватываться большая часть естественного потока.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КПД СИСТЕМЫ ИВПВ

Коэффициент эффективности искусственного восполнения η_z равен отношению расхода воды ΔQ , дополнительно привлекаемой водозабором при восполнении, к общему расходу водозаборного сооружения в этих условиях:

$$\eta_z = \Delta Q / Q_z. \quad (64)$$

Коэффициент эффективности может быть определен по следующей расчетной зависимости:

$$\eta_z = \frac{R_6}{R_6 + S_{\text{доп}}}, \quad (65)$$

где $S_{\text{доп}} = 4\pi k m S_{\text{доп}} / Q_z$.
 $S_{\text{доп}}$ — допустимое понижение уровня подземных вод в скважинах водозабора. (66)

Коэффициент η_z изменяется от 0 до 1. В первом случае влияние восполнения подземных вод на расход водозабора невелико, во втором случае водоотбор полностью обеспечивается за счет восполнения подземных вод.

Глава VIII. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ИВПВ II ТИПА

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Инфильтрационные сооружения закрытого II типа рекомендуется применять в случаях, когда эксплуатируемый водоносный горизонт с поверхности перекрыт непроницаемыми, слабопроницаемыми ($k < 1-2$ м/сут) или слоистыми (с непроницаемыми) породами мощностью > 5 м. Закрытые инфильтрационные сооружения позволяют эффективно решать проблему искусственного подпитывания подземных вод также в тех случаях, когда не может быть предоставлена необходимая площадь под сооружения открытого типа. Закрытые инфильтрационные сооружения получают преимущественное распространение в районах с суровым климатом, где устройство бассейнов, каналов и других открытых сооружений затрудняется из-за возможности их промерзания в зимнее время.

При этом способе восполнения подземных вод трудность эксплуатации инфильтрационных сооружений связана с необходимостью тщательной подготовки воды перед подачей на инфильтрацию. Эффективность работы сооружений ИВПВ II типа и продолжительность межремонтного периода определяются их конструктивными особенностями, а также методами, применяемыми для поддержания их стабильного действия. Необходимость водоподготовки существенно удорожает искусственное подпитывание, поэтому перспективным стало естественное фильтрование и отстаивание исходных поверхностных вод перед подачей в инфильтрационные сооружения. Наряду с этим при создании закрытых инфильтрационных сооружений совершенствуются конструкции скважин или колодцев, в которых предусматривается их регенерация. Закрытые инфильтрационные сооружения целесообразно применять, когда в качестве источника подпитывания используются воды из естественных отстойников (озер, водохранилищ, другого водоносного горизонта), доочищенные сточные воды, отработанные воды с установок кондиционирования воздуха и т. д. В этом случае в качестве закрытых инфильтрационных сооружений устраивают буровые скважины и реже шахтные колодцы и галереи.

При отсутствии естественного отстойника необходимо осуществлять комплекс сооружений для отстаивания воды, а также предварительное фильтрование. Обычно оказывается целесообразным проектировать специальные открытые инфильтрационные сооружения с системой отбора профильтровавшейся воды и подачи ее в скважины или колодцы. Важно отметить, что качество воды, подаваемой в инфильтрационные сооружения ИВПВ II типа, может в некоторой степени улучшаться в водоносном горизонте, а затем подвергаться при необходимости последующей очистке, и в частности, хлорированием. Несоответствие исходной воды требованиям ГОСТ 2874-73 необходимо согласовывать с органами санитарной инспекции.

При относительно малой мутности воды в источнике подпитывания и допустимом качестве ее по другим показателям подают практически неочищенную воду в скважины или колодцы, создавая дополнительные конструктивные устройства, обеспечивающие их эффективную регенерацию. Требования к воде согласовываются в этом случае с соответствующими органами санитарно-гигиенического надзора.

Наиболее распространенными сооружениями инфильтрации закрытого типа являются буровые скважины, кото-

рые подразделяются на три группы. К I группе относятся скважины, через которые подается вода непосредственно в эксплуатируемый водоносный пласт. Вода в такие инфильтрационные скважины может подаваться самотеком, тогда их называют поглощающими; если же вода подается в скважины под давлением, то скважины называются нагнетательными.

Ко II группе относятся скважины, которые, обеспечивая дренирование верхнего водоносного горизонта, позволяют осуществлять переток дренируемой воды в эксплуатируемый водоносный пласт. Эти скважины принято называть дренажно-инфильтрационными (см. рис. 6).

К III группе можно отнести скважины двойного назначения, работающие попеременно как инфильтрационные и водозаборные. Такие скважины применяют, например, при необходимости создавать запасы воды в период обильного поверхностного стока, чтобы использовать накопленную воду во время наступления ее дефицита. III группа скважин используется также для улучшения их приемистости (см. рис. 2).

2. СХЕМЫ СИСТЕМ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОГЛОЩАЮЩИХ СКВАЖИН

Принципиальная схема ИВПВ закрытого типа с использованием скважин сводится к инфильтрации воды через эти скважины в водоносный горизонт, изолированный от поверхности земли. В некоторых случаях в скважинах необходимо повысить напоры, чтобы создать гидравлический барьер, предотвращающий проникновение морских вод в прибрежные районы или защитить подземные воды от загрязнения вблизи очагов загрязнения или промышленных бассейнов.

Дренажно-поглощающие скважины дренируют обычно неэксплуатируемые верхние горизонты, воды которых затем фильтруются в нижележащий эксплуатируемый водоносный горизонт. Верхний водоносный горизонт при этом может пополняться за счет фильтрации вод из рек, водохранилищ или открытых инфильтрационных сооружений. Такого рода подпитывание подземных вод особенно перспективно в суровых природных условиях Севера. В летне-осенний период скважинами каптируются надмерзлотные, таликовые и профильтровавшиеся из открытого водоема воды, которые через инфильтрационные скважины подаются в подмерзлотный водоносный горизонт. В зимне-весенний период при полном промерзании надмерзлотных

вод и поверхностного водного источника эксплуатируют ранее восполненные подземные воды.

Инфильтрационные (поглощающие и нагнетательные) скважины по их условиям работы и конструкции, как отмечено, разделяются на три группы. Инфильтрационные скважины I группы обычно не отличаются от водозаборных. Однако, учитывая более сложные условия эксплуатации, их сооружают большим диаметром и чаще оборудуют фильтрами с гравийной обсыпкой. Инфильтрационные скважины II группы оборудуются фильтрами на дренируемый и поглощающий (восполняемый) водоносные горизонты, что усложняет их конструкцию. Инфильтрационные скважины III группы являются как водозаборными, так и поглощающими; действуют они в соответствии с периодами водозабора из них и поглощения. III группа скважин работает по различным техническим схемам. Например, в период закачки вода может подаваться в кольцевой промежуток между водоподъемной трубой электронасоса и обсадной колонной с установкой водоподающего патрубка на устье скважины; применяется схема и с демонтажем погружного электронасоса (чаще по специально монтируемой колонне, которая должна опускаться под уровень воды в скважине).

Инфильтрационные скважины III группы имеют довольно сложное оборудование. Необходимость демонтировать погружной электронасос затрудняет их эксплуатацию. В то же время положительным является то, что III группа по сравнению со скважинами I группы при тех же условиях более длительное время поддерживает расход на одном уровне.

Основное условие, которое должно обязательно выполняться при подаче воды в скважину, это качественная изоляция устья и соединений водоподающей колонны, в частности, для предупреждения подсасывания в скважину воздуха и последующего воздушного кольматации фильтра и прифильтровой зоны.

Конструктивные особенности поглощающих скважин также связаны с характером подготовки воды перед ее подачей в скважину. Подготовка воды фильтрованием или отстаиванием в естественных или искусственных отстойниках позволяет эксплуатировать инфильтрационные системы закрытого типа длительное время. В этом случае вода, подаваемая в скважины, имеет по мутности характеристики, близкие к водам питьевого качества; аналогичные параметры должна иметь нагретая и утилизируемая вода с установок технологического охлаждения или кондициони-

рования воздуха. Чтобы обеспечить требуемое качество доочищенных сточных и отработанных вод с установок кондиционирования воздуха, система ее транспортирования должна выполняться без разрыва струи. Это предотвратит поступление воздуха в трубопроводы, коррозию трубопровода и появление гидроокиси железа в закачиваемой воде. В целом же конструкции поглощающих скважин должны проектироваться в соответствии с «Руководством по проектированию сооружений для забора подземных вод» и СНиП II-31-74 [31].

К устьевому оборудованию (оголовку) скважины предъявляются особые требования:

сопряжение обсадных труб между собой и с опускаемыми водоподъемными и нагнетательными трубами необходимо делать герметичным, разборным и удобным для монтажа и демонтажа водоподъемного (нагнетательного) оборудования при его ремонте;

устье должно быть достаточно устойчивым для восприятия нагрузки от водоподъемного и нагнетательного оборудования или специальных устройств, применяемых при регенерации скважин;

устье следует предохранять от затопливания талыми, поливными или полыми водами, в нерабочие периоды оно должно быть закрыто и приспособлено для измерения уровня и расхода воды в ходе эксплуатации.

3. ПРОСТЕЙШИЕ СПОСОБЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Учитывая возможность улучшения качества поверхностных вод в водоносном горизонте, а также в случае необходимости и последующую очистку подземных вод при искусственном восполнении, представляют интерес некоторые простейшие способы улучшения качества воды предварительным фильтрованием воды открытого водоисточника перед подачей в скважину. Системы такого рода проектируют, главным образом, самотечными, что позволяет избежать дополнительных энергетических затрат.

Развитие получили комбинированные системы инфильтрационных сооружений и, в частности, поглощающие скважины с подачей воды из дрен-коллекторов. Такие системы имеют инфильтрационные бассейны или площадки. Под дном бассейнов до их сооружений устраивают дрены, объединенные главным коллектором (рис. 25), который в свою очередь соединяют с поглощающей скважиной. Перед каждой скважиной устанавливают задвижку для включения ее на случай ремонта.

Дренажные трубы укладывают с небольшим уклоном к коллектору, а последний — к скважине. При наличии непроницаемых пород насыпается песок слоем не менее 2 м, а около дрены делается засыпка обратного фильтра из гравия высотой до 0,4—0,5 м. По мере заиливания верхней части песка последний снимается примерно на 5 см. Эксплуатируют инфильтрационный бассейн обычным способом. Профильтрованная вода очищается от взвешенных частиц, планктона, существенно улучшаются ее бактериологические показатели. Установка подобного типа построена в 1974 г. в Фресно (Калифорния, США). За время эксплуатации с 1974 по 1976 г. удельная приемистость поглощающей скважины изменялась незначительно. По существу, при рассматриваемом методе восполнения запасов подземных вод осуществляется безреагентная подготовка поверхностных вод.

Менее перспективным с точки зрения охраны качества подземных вод является проектирование систем с подачей неочищенной воды в поглощающие скважины. В этом случае (при восполнении коллекторов в грубозернистых образованиях) намеренно идут на ускоренный кольматаж фильтров скважин и пород в прискважинной зоне, оценивают межремонтный период системы и производят регенерацию. Ввиду трудности удаления взвешенных частиц или

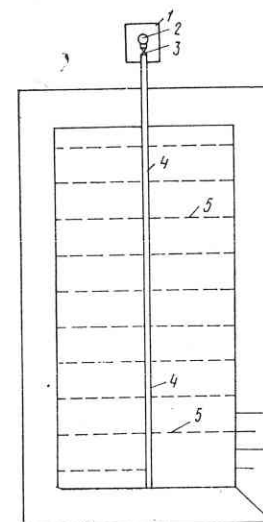


Рис. 25. Схема питания поглощающей скважины из дрен инфильтрационного бассейна

1 — шахта скважины; 2 — поглощающая скважина; 3 — задвижка; 4 — дренажный коллектор; 5 — дренажные трубы

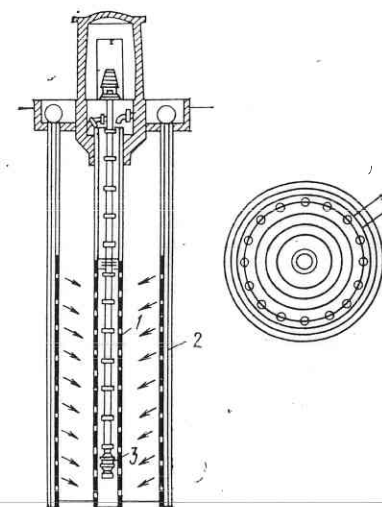


Рис. 26. Поглощающая и декольматирующая скважины

1 — поглощающая скважина; 2 — скважина для промывки; 3 — насос

химического кольматажа обычной прокачкой предусматривают, например, устройство системы скважин в виде кольцевой батареи вокруг поглощающей (инфильтрационной) скважины (рис. 26) для интенсификации промывки фильтра и пород в пласте. Инфильтрация неочищенной поверхностной воды должна быть согласована с санитарной инспекцией.

После заметного снижения проницаемости поглощающей скважины подача в нее неочищенной речной воды прекращается, а в прифильтровые скважины нагнетаются грунтовые воды. Одновременная откачка из центральной скважины ведется до тех пор, пока откачиваемая вода не становится чистой. Технологические параметры эксплуатации таких систем должны отрабатываться в зависимости от гидрогеологических условий и параметров пополняемых водоносных пластов. Такое устройство дополнительной системы скважин вокруг поглощающей скважины дорого и применяется редко.

Интенсификация процесса прокачки и в особенности равномерность декольматации фильтра по вертикали может быть достигнута, если оборудовать поглощающие скважины специальными вибросредствами с наземными вибраторами ВУР-2 или ВУР-3 со стационарным рабочим органом, играющим роль водоподающей трубы. Рабочий орган вибратора представляет собой металлические компрессорные трубы с муфтовыми соединениями, на которых с интервалом 0,5 м наварены резинометаллические диски, устанавливаемые в рабочем интервале скважины. Водоподъемная труба при работе скважины на режиме поглощения при прокачке используется в качестве воздушной.

Способы и рекомендации по восстановлению расхода скважин на воду описаны В. С. Алексеевым и др. [1, 13], а также в «Рекомендациях по импульсным методам восстановления производительности скважин на воду» (М., Изд. ВНИИ ВОДГЕО, 1979) и др.

При ИВПВ с закачкой воды в поглощающие скважины наблюдается часто значительное уменьшение их приемистости или увеличение потребного напора. Следует также учитывать окислительное воздействие кислорода воздуха, попавшего в водоносный горизонт с закачиваемой водой; это может вызвать выпадение осадков в фильтрах скважин и в самом водоносном горизонте, что приведет к уменьшению дебита скважин (или их приемистости).

4. БОРЬБА С ВОЗДУХОМ В ВОДЕ ПРИ ЗАКАЧКЕ ЕЕ В ВОДОНОСНЫЙ ГОРИЗОНТ *

В поверхностных водах, используемых для ИВПВ, растворен воздух. Данные о растворимости воздуха и кислорода из него (при полном насыщении) приведены в табл. 8.

Таблица 8. Зависимость изменения растворимости воздуха и кислорода в чистой воде, свободной от CO_2 и NH_3 , при общем давлении (с паром воды) 0,1013 МПа

№ п. п.	Газ	Температура t , °C			
		0	10	20	30
1	Воздух, $\text{м}^3/\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$ ($\text{кг}/\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$)	29,18 (37,64)	22,84 (29,4)	18,68 (24,1)	15,64 (18,88)
2	Кислород, $\text{м}^3/\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$ ($\text{кг}/\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$)	10,19 (14,57)	7,84 (11,25)	5,75 (8,82)	5,24 (7,49)

Кроме кислорода в воде растворен азот, меньше углекислоты и совсем в небольшом количестве другие газы.

В воздухе содержатся также водяные пары до 4% и реже больше. Пары в воздухе немного уменьшают растворимость его в воде. При общем давлении воздуха 0,1013 МПа, содержащего пары воды, давление последних при $t=20^\circ\text{C}$ составит 0,0023, а при $t=0^\circ\text{C}$ будет 0,00006 МПа. Отсюда легко вычислить уменьшение растворимости других газов. Следует отметить, что процентное по объему содержание кислорода воздуха, растворенного в воде, при $t=0^\circ\text{C}$ и 0,1013 МПа в 1,67 раза больше, чем в атмосфере; при $t=30^\circ\text{C}$ такое процентное отношение почти не меняется, но по абсолютной величине уменьшается почти в 2 раза. Учитывая, что растворимость в воде воздуха и кислорода при повышении температуры уменьшается пропорционально почти одинаково, процент кислорода по отношению к воздуху, растворенному в воде, изменяется мало, правда, немного снижаясь при повышении температуры воды. Следует также учесть, что весовые количества газа, растворенного в воде, изменяются прямо пропорционально давлению, объем же растворенного газа не зависит от давления (при той же температуре).

Из вышеизложенного видно, что растворимость газов в воде сильно изменяется в зависимости от величины давле-

* Автор Н. А. Плотников.

ния и значительно меньше при изменении температуры. Это положение для наших задач весьма важное. В некоторых случаях наблюдается перенасыщение воды воздухом.

Обычно поверхностная вода подается в скважины центробежными насосами. Во всасывающей трубе, в особенности при большом вакууме, выделяются пузырьки воздуха*. Под влиянием кавитации в самих центробежных насосах выделение воздуха усиливается и при этом образуются более крупные пузырьки воздуха. Эти пузырьки при относительно коротких водоводах и большой скорости движения воды в них не успевают растворяться и поступают в водоносный горизонт, забивая часть его пор около скважины, увеличивая сопротивления и уменьшая тем самым поступление воды.

Так как давление в напорных водоносных горизонтах обычно больше и нередко значительно больше атмосферного давления, то пузырьки воздуха могут растворяться в воде, но одновременно при этом поступают новые порции пузырьков воздуха, создавая сопротивления при движении воды. При свободном стоке воды в скважины увлекается дополнительное количество воздуха и в водоносный горизонт поступают его пузырьки.

Методы борьбы с вредным влиянием воздуха и кислорода в нем в различных условиях могут отличаться. Эти методы можно разделить на две группы: профилактические, не допускающие образования пузырьков воздуха; практические, с помощью которых удаляют пузырьки воздуха до скважины. При борьбе с вредным влиянием кислорода воздуха основным способом является дегазация. Способы борьбы с вредным влиянием воздуха, т. е. с инфильтрацией воды через скважины, разработаны еще недостаточно. Наиболее разработана дегазация воды вакуумным и термальным способами.

При ИВПВ через инфильтрационные бассейны подается аэрированная поверхностная вода, т. е. с пузырьками воздуха. В этих бассейнах при медленной инфильтрации (1—3 м/сут и очень редко больше) пузырьки воздуха выделяются в атмосферу и в безнапорный водоносный горизонт поступает вода только с растворенным воздухом. В практике ИВПВ I типа закупорка воздухом пор восполняемого водоносного горизонта не наблюдается. Если и наблюдается в таких условиях ухудшение фильтрационных свойств безнапорного водоносного горизонта, то происхо-

* По данным Л. И. Тарасова, выделение воздуха начинается при вакууме 6 м вод. ст. (К вопросу о гидравлике сифонов. — Водоснабжение и санитарная техника, 1962, № 2).

дит это в связи с химическими процессами и, в частности, в связи с окислением закисного железа в воде кислородом воздуха. С учетом этого замечания, а также исходя из рассмотренных выше физических условий, т. е. основываясь на практических и теоретических данных, можно полагать, что растворенный в воздухе из закачиваемой воды не будет выделяться в водоносных горизонтах, тем более в напорных. Следовательно, необходимо предотвращать образование пузырьков воздуха или удалять их. В связи с этим нельзя допускать свободного стока воды в скважину без герметизации, так как вода может насыщаться пузырьками воздуха. При подкачке воды центробежными насосами нужно стремиться подбирать минимальную высоту всасывания, ставить перед насосом вакуум-колпаки, чтобы удалять пузырьки воздуха, и, наконец, подбирать насосы с наименьшей кавитацией.

При подаче воды по трубопроводу для удаления воздушных пузырьков можно ставить вантузы в повышенных местах, в основном ближе к скважине. Кроме того, при давлении в трубах более 0,1013 МПа скорости движения воды в трубопроводе не должны превышать 1 м/с и длина трубопровода должна быть не менее 200 м. Последнее замечание указывает на то, что более спокойное сосредоточение мелких пузырьков воздуха происходит в верхней части трубопровода. Для борьбы с пузырьками воздуха в водоносном горизонте можно использовать также метод смены закачки откачкой. Все эти методы борьбы с пузырьками воздуха до проектирования целесообразно проверять на опытных установках.

Наименее изученными являются продолжительность растворения пузырьков воздуха в напорном водоносном горизонте и сосредоточение таких пузырьков в верхней части трубопровода при движении воды в нем, а также растворение этих пузырьков воздуха в воде или выделение их в зависимости от физических условий в трубопроводе.

Если удаление пузырьков воздуха в вакуум-колпаке по указанной выше рекомендации вантузом или переменной закачкой и откачкой не достигает цели или необходимо снизить содержание растворенного в воде кислорода, то применяют дегазацию. Этот способ недорогой.

Из существующих методов дегазации воды наиболее экономичным является вакуумный. Схема такой дегазации показана на рис. 27. Осветленная вода подается по трубопроводу 1 на дегазатор 2 в верхнюю его часть и через разбрызгиватель 3 на дырчатую тарелку 4; далее вода идет через насадку 5 из колец Рашига или из деревянных

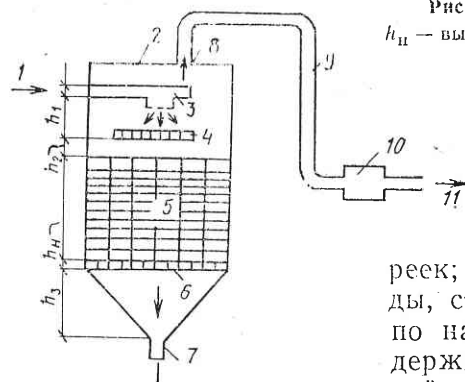


Рис. 27. Схема вакуумной дегазации
 h_n — высота насадки; $h_1=500-600$ мм; $h_2 \approx 200$ мм; $h_3 \approx 200-300$ мм

реек; воздух выделяется из воды, стекаемой тонкой пленкой по насадке; эта насадка поддерживается разборной решеткой 6. Дегазированная вода

поступает в нижнюю часть дегазатора 7, отводится и засасывается центробежным насосом и затем по трубопроводу подается в скважины. Выделяемые воздух и пар отсасываются в верхней части дегазатора 8 и по трубам 9 поступают в вакуум-электронасос 10; далее пар и воздух удаляются по трубе 11.

Приведенная схема может несколько видоизменяться. Например, вместо вакуум-электронасоса могут быть поставлены водоструйные или пароструйные эжекторы; вообще отвод воды может быть выполнен даже без вышеуказанных центробежного насоса и эжекторов путем выпуска воды (под уровень водоприемника), но с созданием необходимой высоты вакуума. Имеются и другие схемы вакуумной дегазации, например с подогреванием воды. Чем выше вакуум и чем выше температура воды при пленочном ее стекании по упомянутой насадке, тем больше будет снижаться содержание воздуха (кислорода в нем и других газов).

При расчетах дегазатора принимают требующийся расход воды Q_v , максимальную концентрацию удаляемого газа в исходной воде ($C_{вх}$ — с добавлением индекса газа, например для кислорода $C_{вх.о}$), концентрацию газа после дегазации $C_{вых}$ также с индексом газа, а также температуру исходной воды. Расчетная выходная концентрация газа $C_{вых}$ из дегазатора принимается с запасом на 10—15%; оптимальная величина выходной концентрации газа (воздуха и составных его частей) для искусственного восполнения подземных вод не установлена. Предварительно можно принимать: для кислорода $C_{вых} = 0,5-3 \text{ кг/м}^3 \times 10^{-3}$ в зависимости от возможного окисления и выпадения осадков из воды; дегазация воздуха (без учета кислорода) пока используется редко, хотя это дешевый способ.

При расчетах дегазации требуется определить площадь поперечного сечения дегазатора F_d , расход выделяемого газа Q_g , площадь поверхности насадки S_n , высоту загрузки дегазатора h_n и т. д.; кроме того, подбирают вакуум-насос или эжектор. Такие расчеты можно делать, пользуясь рекомендациями В. А. Клячко и И. З. Апелцина (Очистка природных вод. М., Стройиздат, 1971), А. А. Кастальского и др.

Следует иметь в виду, что даже при незначительном подогреве воды, например с 8 до 30°C, чтобы снизить концентрацию растворенного в воде кислорода с 8—12 до 0,05 мг/л, площадь поверхности насадки уменьшается примерно в 2 раза, а требуемый вакуум несколько сокращается. Поэтому может быть целесообразно использовать близко сбрасываемую из системы охлаждения воду с повышенной температурой для подогрева воды, подаваемой в дегазатор. Вода может подогреваться до температуры немного выше температуры подземных вод. В течение года поверхностные воды подогреваются при разных режимах.

5. РАСЧЕТ РАСХОДА ПОГЛОЩАЮЩИХ СКВАЖИН

При расчетах поглощающих скважин различают два предельных режима их работы: $Q_0 = \text{const}$ и $S_0 = \text{const}$ [где Q_0 — дебит скважин и S_0 — повышение уровня (напора) воды в скважинах].

На практике целесообразнее эксплуатировать поглощающие скважины в режиме $Q_0 = \text{const}$. Режим $Q_0 = \text{const}$ может быть обеспечен как при свободной инфильтрации, так и в случае подачи воды в скважины с помощью насосных установок.

Для несовершенных поглощающих скважин, действующих в режиме $Q_0 = \text{const}$, повышение напора в скважине определяется по формуле

$$S_0 = S_n + S_c; \quad S_n = \frac{Q_0}{4\pi T} R; \quad S_c = \frac{Q_0}{2\pi T} \zeta_c, \quad (67)$$

где S_n — повышение уровня воды в скважине, обусловленное сопротивлением пласта R ; S_c — повышение напора, вызванное дополнительным сопротивлением ζ_c на несовершенство скважины; T — водопроницаемость пласта.

Безразмерное сопротивление скважины ζ_c определяется из равенства

$$\zeta_c = \zeta_0 + \zeta_f, \quad (68)$$

где ζ_0 — дополнительное сопротивление, обусловленное неполнотой вскрытия водоносного горизонта и зависящее лишь от соотношения параметров l_0/m и m/r_0 (где l_0 — длина и r_0 — радиус фильтра скважины); ζ_ϕ — дополнительное сопротивление на несовершенство скважины по характеру вскрытия водоносного горизонта.

Сопротивление ζ_0 обычно рассчитывают по формулам, вытекающим из решения гидродинамической задачи о притоке воды к скважинам, не полностью вскрывающим пласт. Решение этой задачи было получено М. Маскетом, А. А. Хейном, И. А. Чарным, В. Н. Никольским, Н. Н. Веригиным и др. Определение ζ_0 приводится также в работах [1, 32] и др.

Значительно сложнее дело обстоит с определением ζ_ϕ . Дополнительное сопротивление на несовершенство скважины по характеру вскрытия водоносного пласта ζ_ϕ зависит от многих факторов, которые зачастую не поддаются теоретическому анализу. Поэтому наиболее правильным в настоящее время считается определение ζ_ϕ по данным опытных откачек из скважин по формуле

$$\zeta_\phi = \frac{2\pi T S_0}{Q_0} - (0,5R + \zeta_0). \quad (69)$$

При расчете повышения уровня воды в поглощающих скважинах необходимо учитывать потери напора при движении воды через фильтр скважины. Для скважин, оборудованных фильтровым каркасом, можно принять, что имеют место две области: первая область размером $r_0 - r_c$ и вторая размером $R_\pi - r_c$ (где r_c — радиус бурения скважины). В пределах первой области коэффициент фильтрации k_ϕ (где k_ϕ — коэффициент фильтрации каркаса фильтра с учетом наложения на него пород, пласта), во второй k_π . Тогда для скважин с полным вскрытием водоносного горизонта можно записать

$$S_0 = \frac{Q_0}{2\pi m k_\pi} \left(\ln \frac{R_\pi}{r_0} + \zeta_\phi \right), \quad (70)$$

где
$$\zeta_\phi = \left(\frac{k_\pi}{k_\phi} - 1 \right) \ln \frac{r_c}{r_0}.$$

Аналогичным образом можно получить выражение для определения ζ_ϕ применительно к скважинам с гравийными или блочными фильтрами. Ввиду малости сопротивления фильтрового каркаса здесь также можно считать, что имеют место две области: первая — область фильтра и вторая — область пласта. Коэффициент фильтрации в пределах первой области следует принимать равным его среднему значению.

6. ПРОГНОЗ РЕЖИМА РАБОТЫ ПОГЛОЩАЮЩИХ СКВАЖИН

Основная особенность расчета расхода поглощающих скважин заключается в необходимости учитывать процессы коьматажа прискважинных зон пласта, которые увеличивают дополнительное сопротивление ζ_ϕ . Для поглощающих скважин, действующих в режиме $Q_0 = \text{const}$, коьматаж резко увеличивает потребный напор и соответственно сокращает период работы в режиме свободного налива.

В зависимости от качества воды, используемой для восполнения запасов подземных вод, и от степени ее очистки перед подачей на закрытые инфильтрационные сооружения различают следующие виды коьматажа:

механический коьматаж, являющийся следствием наличия в воде взвешенных частиц органического и минерального происхождения;

химический коьматаж, связанный с нарушением химического равновесия и, как следствие, с выпадением из воды труднорастворимых соединений;

биологический коьматаж, возникающий в результате развития железобактерий, сульфатредуцирующих бактерий и других видов биологической деятельности;

воздушный коьматаж, обусловленный накоплением воздуха в порах пород прискважинной зоны.

Наиболее интенсивно при эксплуатации поглощающих скважин протекают процессы механического коьматажа. Однако в зависимости от конструктивных особенностей водоприемной части скважин и литологического строения пород водоносного пласта коьматаж протекает по разному.

В водоносных пластах, представленных мелко- и среднезернистыми песками при устройстве скважин, оборудованных лишь фильтровыми каркасами, наблюдается основное образование слоя из взвешенных частиц на внутренней поверхности фильтра. При сооружении в таких условиях скважин с гравийными или блочными фильтрами взвешенные частицы могут проникать уже в поры грунта и задерживаться там, коьматируя прискважинную зону. Аналогичным образом протекает коьматаж в пластах, представленных крупнозернистыми песками и гравийными отложениями, а также в трещиноватых породах.

Для разработки методики прогноза роста дополнительного сопротивления ζ_ϕ ниже приводятся решения ряда задач фильтрации и массообмена.

Кольматаж скважин, обусловленный образованием слоя взвешенных частиц на внутренней поверхности фильтра, был исследован в работах И. А. Апельцина и Н. Н. Веригина и др. Следуя работе Н. Н. Веригина [1979 г.] выразим динамику роста слоя осадка на внутренней поверхности фильтра следующим уравнением

$$dr/dt = -Q_0 C_0 / 2\pi l_0 r, \quad (71)$$

где C_0 — концентрация взвешенных частиц в воде, поступающей в скважину ($C_0 = M/\gamma$, M — мутьность воды и γ — объемная масса взвешенных частиц); l_0 — длина фильтра; r — расстояние от центра скважины до поверхности образовавшегося слоя в момент времени t ; $(r_0 - r)$ — толщина слоя осадка на внутренней поверхности фильтра.

Интегрируя уравнение (71) от r_0 (0) до $r(t)$, получим

$$r = r_0 \sqrt{1 - \alpha_{oc} t}, \quad (72)$$

$$\text{где } \alpha_{oc} = Q_0 C_0 / \pi l_0 r_0^2.$$

Далее примем, что коэффициент фильтрации образовавшегося слоя осадка равен k_{oc} . Тогда потеря напора при движении воды через этот слой составит

$$\Delta S_{oc} = \frac{Q_0}{2\pi l_0 k_{oc}} \ln \frac{r_0}{r} = -\frac{Q_0}{4\pi l_0 k_{oc}} \ln (1 - \alpha_{oc} t). \quad (73)$$

Поскольку концентрация взвешенных частиц в воде очень мала, то, считая, что $\alpha_{oc} t \ll 1$, вместо (73) можно записать приближенно следующее выражение

$$\Delta S_{oc} \cong Q_0 \alpha_{oc} t / 4\pi k_{oc} l_0. \quad (74)$$

При этом дополнительное сопротивление на несовершенство скважины по характеру вскрытия водоносного пласта составит

$$\zeta_{\Phi} = \left(\frac{k_{\Pi}}{k_{\Phi}} - 1 \right) \ln \frac{r_c}{r_0} + 0,5 \frac{k_{\Pi} \alpha_{oc}}{k_{oc}} t. \quad (75)$$

Кольматаж скважин, обусловленный проникновением и отложением взвешенных частиц в прискважинной зоне пласта, был исследован в работах Н. Н. Веригина, Ю. М. Шехтмана, В. С. Алексеева, Г. М. Коммунара и др.

Повышение уровня в скважине в указанных условиях при $t > 0$ определяется по формуле (70), где ζ_{Φ} — дополнительное сопротивление, обусловленное кольматажем пород прискважинной зоны пласта, определяется по формуле

$$\zeta_{\Phi} = \left(\frac{k_{\Pi}}{k_{\Pi K}} - 1 \right) \ln \frac{R(t)}{r_0} = 0,5 \left(\frac{k_{\Pi}}{k_{\Pi K}} - 1 \right) \ln \left(1 + \frac{Q_0 t}{\pi m r_0^2 \alpha_{\Pi}} \right), \quad (76)$$

где $k_{\Pi K}$ — коэффициент фильтрации пород в зоне кольматации.

В том случае, если в начальный момент времени дополнительное сопротивление $\zeta_{\Phi} \neq 0$ (т. е. вблизи скважины уже имеется зона с кольцевой неоднородностью), то вначале кольматаж будет протекать в пределах этой зоны, а затем уже распространится и в пласт. При $t=0$ повышение уровня воды в скважине определится в соответствии с формулой (70), где ζ_{Φ} — дополнительное сопротивление в момент $t=0$ — $\zeta_{\Phi}(0)$.

При $t > 0$ начинается выпадение из воды взвешенных частиц и в пределах области $|r_0 - r_c|$ образуется зона кольматажа. До тех пор, пока $R(t) \leq r_c$, повышение уровня воды в скважине будет определяться также по формуле (70), но ζ_{Φ} останется дополнительным сопротивлением с учетом уже кольматации в фильтровой зоне — $\zeta_{\Phi}(t)$, т. е.

$$\zeta_{\Phi}(t) = \left(\frac{k_{\Pi}}{k_{\Phi}} - 1 \right) \ln \frac{r_c}{r_0} + \left(\frac{k_{\Pi}}{k_{\Phi K}} - \frac{k_{\Pi}}{k_{\Phi}} \right) \ln \frac{R_1(t)}{r_0}, \quad (77)$$

где $k_{\Phi K}$ — коэффициент фильтрации фильтра в зоне кольматажа $r_0 - R_1(t)$; $R_1(t)$ — размеры зоны кольматажа.

$$R_1(t) = r_0 \sqrt{1 + \frac{Q_0 t}{\pi m r_0^2 \alpha_{\Phi}}}, \quad (78)$$

где $\alpha_{\Phi} = [N_{\Phi} + (n_{\Phi} - N_{\Phi}) C_t] / C_0$; n_{Φ} — пористость пород в области $(r_0 - r_c)$; N_{Φ} — грязеёмкость зоны.

Время, в течение которого кольматаж будет протекать в области $(r_0 - r_c)$, определится из формулы (78)

$$t_1 = \pi m \alpha_{\Phi} (r_c^2 - r_0^2) / Q_0. \quad (79)$$

При $t > t_1$ область $(r_0 - r_c)$ полностью закольматирована и процесс распространится в пласт. При $R(t) > r_c$ повышение уровня воды в скважине будет также определяться из формулы (70), а величина $\zeta_{\Phi}(t)$ составит:

$$\zeta_{\Phi}(t) = \left(\frac{k_{\Pi}}{k_{\Phi K}} - 1 \right) \ln \frac{r_c}{r_0} + \left(\frac{k_{\Pi}}{k_{\Pi K}} - 1 \right) \ln \frac{R_2(t)}{r_c}, \quad (80)$$

$$\text{где } R_2(t) = r_c \sqrt{1 + \frac{Q_0 (t - t_1)}{\pi m r_c^2 \alpha_{\Pi}}},$$

$$\alpha_{\Pi} = \frac{N_{\Pi} + (n_{\Pi} - N_{\Pi}) C_t}{C_0},$$

где n_{Π} — пористость пород водоносного пласта; N_{Π} — их грязеёмкость; $k_{\Pi K}$ — коэффициент фильтрации пород в зоне кольматажа.

Коэффициент фильтрации пород в зоне кольматажа $k_{\Pi K}$ зависит от массы осадка, отложившегося в порах

грунта. Эта зависимость обычно принимается в виде

$$k_{п.к} = k_{п} \left(1 - \frac{b}{n_0}\right)^{\bar{m}}, \quad (81a)$$

где b — удельный объем отложений, изменяющийся в процессе кольматажа от 0 до N_0 ; N_0 — предельная емкость поглощения пород $N_0 < n_0$ и n_0 — начальная пористость пород; $k_{п}$ — начальное значение коэффициента фильтрации пород; $\bar{m}$ — показатель степени, принимающий значение $\bar{m}=2,8$ согласно модели грунта, предложенной Слехте-ром, и $\bar{m}=3$ по Козени.

На рис. 28 приведены графики изменения $k_{п.к}/k_{п}$ от b/n_0 , построенные по формуле (81a) при $\bar{m}=2,8$ и $\bar{m}=3$, и данные, полученные в результате обработки опытов по кольматации грунтов. Как видно, формула (81a) вполне удовлетворительно описывает результаты опытов практически во всем диапазоне изменения величины b/n_0 .

При $b/n_0 \leq 0,4$ формула (81a) может быть приведена к виду (рис. 29)

$$k_{п.к} = k_{п} \left(1 - 2 \frac{b}{n_0}\right). \quad (81б)$$

При равновесном массообмене величина b мгновенно достигает своего предельного значения N_0 и, следовательно, коэффициент фильтрации пород в зоне кольматажа составит

$$k_{п.к} = k_{п} \left(1 - \frac{N_0}{n_0}\right)^{2,8-3} \approx k_{п} \left(1 - 2 \frac{N_0}{n_0}\right). \quad (81в)$$

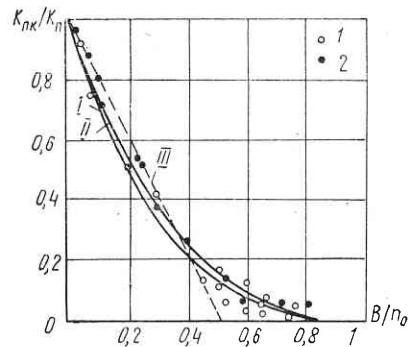


Рис. 28. Зависимость коэффициента фильтрации $k_{п.к}/k_{п}$ от насыщенности пород осадком b/n_0

1 — по данным Д. М. Минца и В. З. Мельцера; 2 — по данным Г. М. Коммунара; I, II — теоретические кривые при $\bar{m}$, равном 3 и 2,8; III — теоретическая прямая при $b/n_0 \leq 0,4$

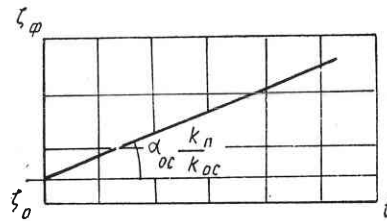


Рис. 29. Методика оценки параметров кольматажа при образовании пленки на внутренней поверхности фильтра

В работах Ю. М. Шехтмана, Д. М. Минца, Н. Н. Веригина, Г. М. Коммунара и других был исследован кольматаж скважин для некоторых случаев неравномерного массообмена, когда $\gamma \neq \infty$ и накопление осадков в прискважинных зонах пласта протекает во времени. Такая задача имеет сложное решение, но можно, следуя работе В. С. Алексеева и Г. М. Коммунара, принять, что кольматаж протекает лишь вблизи скважины, и записать

$$b(t) = N_{\phi} (1 - e^{-\Delta c \gamma t}), \quad (82)$$

где $\Delta c \gamma$ — обобщенный безразмерный параметр.

Подстановка зависимостей (82) и (81) в формулу (70) при $k_{\phi} = k_{\phi}(t)$ дает следующее выражение для функции $\zeta_{\phi}(t)$

$$\zeta_{\phi}(t) = \left\{ \frac{k_{п}}{k_{\phi} \left[1 - \frac{N_{\phi}}{n_{\phi}} (1 - e^{-\Delta c \gamma t}) \right]^{\bar{m}}} - 1 \right\} \ln \frac{r_c}{r_0}, \quad (83a)$$

а при $N_0 \rightarrow n_0$ имеем

$$\zeta_{\phi}(t) = \left(\frac{k_{п}}{k_{\phi}} e^{\bar{m} \Delta c \gamma t} - 1 \right) \ln \frac{r_c}{r_0}. \quad (83б)$$

Для оценки параметров кольматажа и прогноза роста дополнительного сопротивления $\zeta_{\phi}(t)$ во времени необходимо вести контроль за работой поглощающих скважин. В том случае, если кольматаж скважин обусловлен образованием слоя осадка на внутренней поверхности фильтра, то $\zeta_{\phi}(t)$ увеличивается пропорционально времени. Для прогноза роста величины $\zeta_{\phi}(t)$ необходимо определить комплексный параметр $k_{п\alpha oc}/k_{oc}$. Он может быть установлен, если известны два значения $\zeta(t_1, t_2)$ для времени $t_{1,2}$, включая $t=0$. На рис. 29 приведен график принципиальной связи $\zeta_{\phi}-t$. Угол наклона на этом графике равен $k_{п\alpha oc}/k_{oc}$, а отрезок на оси ζ_{ϕ} определяет $\zeta_{\phi}(0)$. Зная значения $\zeta_{\phi}(0)$ и параметра $k_{п\alpha oc}/k_{oc}$, по формуле (75) рассчитывается дополнительное сопротивление $\zeta_{\phi}(t)$. Если $\zeta_{\phi}(t)$ увеличивается во времени по логарифмическому закону, то происходит кольматаж прискважинной зоны при равновесных условиях массообмена. В этом случае расчеты проводятся по формуле (76) при $\zeta_{\phi}(0)=0$, а при $\zeta_{\phi}(0) \neq 0$ по формулам (77) и (80). Наконец, если $\zeta_{\phi}(t)$ имеет во времени экспоненциальный рост, то расчет ведется по формулам (83a) или (83б).

7. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСХОДА СКВАЖИН

Даже в случае тщательной подготовки воды, подаваемой в скважину, как правило, происходит кольматация фильтров и прифилтровых зон, что заставляет проводить регенерацию нагнетательных (поглощающих) систем. Основными причинами кольматации при подаче в скважины очищенных вод являются проникание воздуха через неплотности в соединениях водоподающих труб и выделение его в порах водоносной породы, отложение в призабойной зоне гидроокислов железа, образующихся при коррозии водоводов и водосборных емкостей, а также биологические обрастания. Кроме того, при подаче в скважины неочищенных вод существенно интенсифицируется механический, химический и биологический кольматаж и для регенерации необходимы комбинированные интенсивные воздействия на фильтр и прифилтровые зоны скважин.

Способ восстановления расхода нагнетательных или поглощающих скважин выбирается в зависимости от характера и основных причин кольматации, с учетом особенностей конструкции скважины и ее водоприемной части.

При воздушном кольматаже фильтра и пористой среде в прифилтровой зоне при выполнении основного требования для обеспечения герметизации самой скважины и системы подачи в нее воды положительный эффект дает вакуумирование ствола скважины или импульсно-имплозионная обработка, а также ряд методов, изложенных выше. Имплозионный эффект основан на создании внутри фильтра значительного перепада давления за счет формирования области с пониженным давлением относительно гидростатического давления (В. С. Алексеев и др.). Мгновенное создание вакуума (пониженного давления) в фильтре обеспечивает интенсивный срыв пузырьков воздуха с твердых частичек пористой среды и удаление его из скважины. Характерная особенность имплозионного воздействия заключается еще и в том, что в начальный момент времени, соответствующий максимальному перепаду давления и фильтрационному градиенту, фильтрационный поток воды и воздуха направлен внутрь ствола скважины.

Для обработки фильтров и призабойной зоны скважин методом имплозии используются капсулы, представляющие собой толстостенные цилиндрические сосуды, находящиеся под вакуумом. Сосуды разрушаются при определенном гидростатическом давлении на заданной глубине. Возможно и принудительное разрушение сосудов, находящихся под вакуумом, непосредственно в филтровой части сква-

жин задавливанием в герметизированную скважину жидкости под давлением либо применением посыльного груза. Повторное и многократное осуществление имплозии в скважинах достигается применением специальных устройств, опускаемых в скважину на каротажном кабеле или насосно-компрессорных трубах.

При химическом и биологическом кольматаже фильтров и прифилтровых зон гидроокислами железа наряду с импульсными методами (взрывом ТДП, электрогидроударом или пневмовзрывом) могут быть рекомендованы реагентные обработки и комбинированное воздействие (совместная реагентная и импульсная обработка) [1] и др.

В качестве наиболее эффективного реагента в этом случае можно рекомендовать соляную кислоту концентрацией 20—25%. Процесс растворения гидроокислов железа интенсифицируется при нагреве кислоты до 50—60°C. Заменить соляную кислоту можно порошкообразными реагентами-нейтрализаторами: бисульфатом натрия (NaHSO_4) концентрацией раствора 5—7% или сульфаминовой кислотой ($\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$) концентрацией 7—10%. Следует, однако, иметь в виду, что ее растворяющая способность железистых соединений в 10 раз ниже, чем у соляной кислоты.

При относительно длительном межремонтном периоде наблюдается дегидратация гидроокислов железа, в связи с чем резко ухудшается их растворимость в реагентах-нейтрализаторах. В этих условиях весьма эффективно применять порошкообразный дитионит натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), оптимальные параметры использования которого — концентрация 6—8%, рН среды 6—8, температура не выше 18°C. Дитионит натрия не проявляет корродирующего действия на металлические конструктивные элементы скважин, обработку же реагентами-нейтрализаторами необходимо осуществлять с ингибиторами коррозии. При относительно небольшом межремонтном периоде нагнетательных (поглощающих) скважин допустимо применять полифосфаты натрия (триполифосфаты $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ и гексаметафосфаты $\text{Na}_2[\text{Na}_4(\text{PO}_3)_6]$) концентрациями 5—8%. Отличительным свойством полифосфатов является их способность стабилизировать водные растворы даже при существенно больших значениях рН в сравнении с нейтральными.

Технология производства работ при реагентной обработке скважин подробно описана в ряде рекомендаций и руководств и, в частности, в работах, отмеченных ранее. При наличии затрубных скважин можно подавать реагент в эти скважины, удаляя продукты реакции из эксплуатационной скважины откачкой.

Интенсификацию процесса растворения колюматизирующих отложений и удаление их из прифилтровой зоны можно обеспечить сочетанием импульсного и реагентного воздействия. Возможно предварительное разрушение колюматанта импульсными методами с последующей реагентной обработкой и одновременной импульсно-реагентной обработкой.

В первом случае в скважине можно взрывать торпеду из детонирующего шнура (ТДШ), обрабатывать ее, применяя электрогидроудар, производить пневмовзрыв или имплозию. При взрыве ТДШ в фильтре скважины создается импульс с давлением от 35 до 100 МПа, электрогидроудар — 4—6 МПа, пневмовзрыв — 1—3 МПа, имплозия — 0,02—1 МПа. После импульсной обработки одним из упомянутых методов и прокачки скважины производят реагентную регенерацию по обычной технологии.

Комбинированное совместное импульсное воздействие отработано в максимальной степени при сочетании вибрации и реагента. Вибрация в стволе скважины создается специальными скважинными вибраторами типа ВУР-2, ВУР-3 или агрегатами для вибрационного освоения скважин АВО-1, АВО-2, разработанными ВНИИГС Минмонтажспецстроя СССР. Этими вибраторами в фильтре создаются колебания с частотой до 10 Гц и амплитудой гидродинамического давления до 0,4 МПа. При электровибрационной обработке скважин создаются вибрационные колебания с частотой до 50 Гц и амплитудой до 0,8 МПа. Возможно и реагентно-акустическое воздействие на фильтр и прифилтровую зону с использованием ультразвуковой установки, разработанной НИИОСП им. Н. М. Герсеева.

Существующие разработки оборудования и технологии регенерации скважин на воду позволяют эффективно восстанавливать их расход и существенно увеличивать сроки эксплуатации систем водозаборных, нагнетательных скважин, а также скважин двойного назначения.

Глава IX. КОМПЛЕКСНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СИСТЕМ «СКВАЖИНЫ — ВОДОПОДЪЕМНИКИ — ВОДОВОДЫ»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящее время при проектировании водозаборных сооружений обычно различают два предельных режима их работы: режим $Q = \text{const}$ и режим $S = \text{const}$ (где Q — де-

биты скважин и S — понижение уровня воды в скважине). Однако на практике такие условия реализуются далеко не всегда, и в процессе эксплуатации водозаборов наблюдается непрерывное изменение как понижений уровня воды, так и расхода скважин.

Причина этого заключается в следующем [2]. Подземные водозаборы, как правило, проектируются в виде группы скважин, объединенных между собой системой сборных водоводов, по которым вода от скважин с помощью насосных установок подается потребителю. Таким образом, водозаборы представляют собой как бы единую гидравлическую систему и режим работы отдельных элементов этой системы (скважин с водоносным горизонтом, насосов, водоводов и сооружений на сети) является взаимосвязанным. В силу этого любые изменения, происходящие на участке водозабора (нарушение гидрогеологических условий на границах пласта, изменение гидравлических параметров систем сбора и подачи воды и т. п.), приводят к перераспределению нагрузок между скважинами и, следовательно, к изменению их расхода. Зачастую эти изменения бывают столь существенными, что нарушаются основные условия и суммарная подача воды от скважин Q_v становится меньше, чем требуется по расчету, а понижения уровня S в скважинах начинают превышать допустимые значения. Чтобы обеспечить требуемый режим работы водозаборных сооружений и обоснованно наметить мероприятия, направленные на повышение эффективности работы действующих систем, необходим комплексный подход к расчету водозаборов подземных вод, при котором были бы учтены условия совместной работы всех элементов системы.

Одним из первых задачу по расчету систем подачи воды от скважин рассмотрел Н. Н. Омелин в 1960 г. В дальнейшем им был разработан графоаналитический метод расчета совместной работы скважин и насосных установок на общий водовод, а для одиночных скважин были составлены таблицы по подбору водоподъемного оборудования (погружных скважинных насосов). Независимо от Н. Н. Омелина графоаналитический метод расчета режима работы одиночных скважин, действующих в условиях стационарного и нестационарного потоков подземных вод, был разработан в 1964 г. П. Г. Добровольским, а позднее их работы были обобщены в статье В. П. Старинского. Графоаналитические методы расчета являются весьма наглядными. Однако должного применения в практике проектирования водозаборов подземных вод они не нашли. Это, в

первую очередь, объясняется тем, что для получения решения требуется провести зачастую сложные графические построения, объем которых возрастает с увеличением числа скважин.

Дальнейшему развитию методов расчета режимов работы скважин и систем подачи воды в значительной мере способствовало широкое внедрение в практику проектирования ЭВМ. П. Д. Хоруджиев в 1964 г. разработал аналитический метод расчета стационарных режимов работы системы скважин с учетом установки в них водоподъемного оборудования. Реализация этого метода им была осуществлена на ЭВМ «Проминь» для простейших схем компоновки водозаборных сооружений, а В. П. Старинским в 1971—1973 гг. для водозаборов с произвольной схемой сбора воды от скважин применительно к ЭВМ «Минск-22».

В ГДР Л. Лукнер и другие разработали комплексную программу, предназначенную для расчета стационарных и нестационарных режимов работы водозаборов, действующих в различных гидрогеологических условиях, при сифонном и насосном отборе воды из скважин. Программа реализована на ЭВМ БЭСМ-6, и по данным авторов, широко используется в практике проектирования водозаборов подземных вод и при расчете систем водопонижения.

2. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ И АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ РАСЧЕТА СИСТЕМ

Рассмотрим простейшую схему подачи воды от скважины по напорному водоводу в приемный резервуар (рис. 30).

В этом случае насос, установленный в скважину, должен развивать напор, равный

$$H = z + S + \Delta h_b, \quad (84)$$

где H — полная высота подъема воды из скважины; z — геометрическая высота подъема воды, равная разности отметок между уровнем воды в резервуаре и уровнем статического горизонта; Δh_b — потери напора в водоводе на участке от насоса до точки подачи воды; S — понижение уровня воды в скважине.

При заданном значении $Q = Q_p$ (где Q_p — требуемая подача воды от скважины) по формуле (84) вычисляется $H = H_p$ (где H_p — расчетная высота подъема воды из скважины) и по величинам Q_p , H_p подбирается нужный насос. Погружные скважинные насосы обычно подбирают по графикам рабочих характеристик $Q-H$, полученным на основе заводских испытаний насосов. Для большинства насосов, выпускаемых отечественной промышленностью,

Рис. 30. Расчетная схема «скважина — насос — водовод»

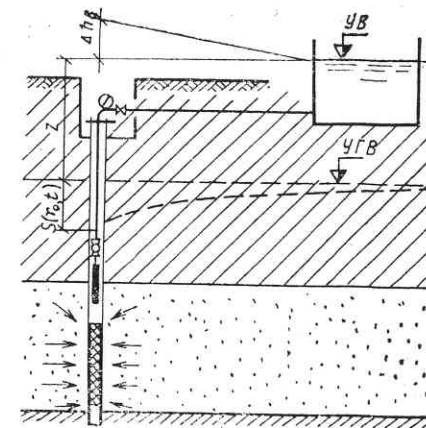


Рис. 31. Схема графоаналитического метода расчета системы «скважина — насос — водовод»

1 — рабочая точка насоса; 2 — кривая понижения уровня воды в скважине; 3 — кривая гидравлических сопротивлений в водоводе

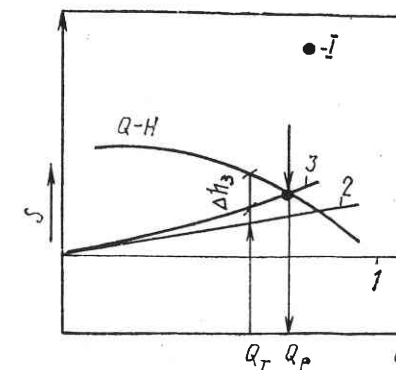
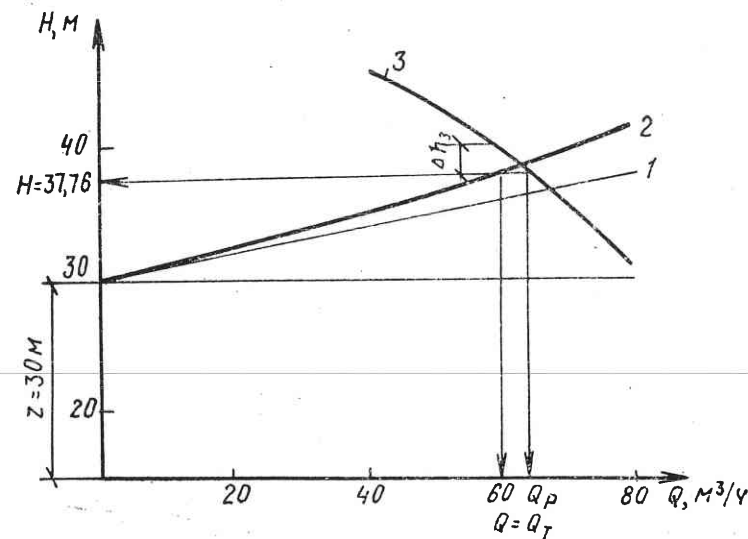


Рис. 32. Расчет рабочей точки насоса



графики рабочих характеристик насосов приведены в каталогах и справочниках. Однако зачастую из имеющегося сортамента насосов не удастся подобрать такой, рабочая точка которого точно бы соответствовала расчетным значениям Q_p и H_p . Поэтому на практике насосы подбирают с некоторым запасом по напору и регулируют их подачу. Такое регулирование, как правило, осуществляется с помощью задвижек, установленных на напорных линиях.

Рассмотрим графоаналитический метод расчета системы «скважина—насос—водовод» на примере работы сооружений по схеме рис. 30.

Понижение уровня напорных подземных вод в скважине в процессе откачки определяется по формуле

$$S = Q/(R_0 + \zeta_c)4\pi, \quad (85)$$

где R_0 — фильтрационное сопротивление водоносного пласта; ζ_c — дополнительное сопротивление на несовершенство водозаборной скважины по степени и по характеру вскрытия водоносного пласта; T — коэффициент водопроводимости пласта.

Формулу (85) можно переписать в виде

$$S = Q/q, \quad (86)$$

где $q = \pi T/(R_0 + \zeta_c)$; q — гидравлическое сопротивление элемента, моделирующего работу скважины, или, как принято в практике гидрогеологических расчетов, величина q — это удельный дебит скважины.

Потери напора на участке водовода от насоса до резервуара составляют (с небольшой ошибкой)

$$\Delta h_b = (S_T + S_B) Q^2 \quad (87)$$

где S_T и S_B — сопротивление водоподъемных труб и водовода соответственно.

Таким образом, подставив формулы (86) и (87) в уравнение (84), получим

$$H = z + \frac{Q}{q} + (S_T + S_B) Q^2, \quad (88)$$

где $H=f(Q)$ — график $Q-H$ характеристики насоса.

Графоаналитическое решение уравнения (88) приведено на рис. 31. Это решение было получено следующим образом. На высоте z проводится линия 1, параллельная оси абсцисс, и от нее для каждого Q отсчитываются значения S и Δh_b . Линия 2 на рис. 31 — характеристика скважины, т. е. график зависимости $S=Q/q$, а линия 3 — характеристика водовода. Разность по высоте между линиями 3 и 2 равна Δh_b . Если на этот график нанести рабочую характеристику насоса $Q-H$, то на пересечении линии 3 с $Q-H$ будет находиться рабочая точка насоса. Таким образом, в результате графических построений устанавли-

вают все искомые величины, а именно расход Q_p скважины (насоса), напор насоса H_p , понижение уровня воды в скважине S_p и потери напора в водоводе Δh_b .

Относительно просто в этом случае решаются и задачи регулирования режима работы системы «скважина—насос—водовод». Так, например, если величина Q_p , установленная расчетом, превышает требуемую подачу воды Q_t , то прикрытием задвижки на напорной линии, как отмечалось выше, можно регулировать подачу насоса с уменьшением ее до значения Q_t . Графоаналитическое решение этой задачи приведено на рис. 32. Решение находится на пересечении линий 2—3 и $Q-H$ с перпендикуляром к оси абсцисс в точку $Q=Q_t$. Отрезок между линией 3 и $Q-H$ насоса на перпендикуляре определяет величину напора, дросселируемого задвижкой. Аналогичным образом может быть найдено решение, когда по условию задачи требуется обеспечить заданное понижение уровня воды в скважине S_t . Для этого на графике характеристики скважины находят точку, равную S_t , и из нее опускают перпендикуляр на ось абсцисс. Пересечение перпендикуляра к линии абсцисс Q с кривыми характеристик скважины (2), водовода (3) и насоса (QH) позволяет найти решение задачи регулирования режима работы системы на точку $S=S_t$.

Пример 4. Обеспечить подачу воды от скважины в резервуар в количестве $Q=60$ м³/ч. Известно, что удельный дебит скважины $q=10$ м³/ч на 1 м понижения, а геометрическая высота подъема воды $z=30$ м. Резервуар находится на расстоянии $l=200$ м и к нему проложен водовод $D=150$ мм. Требуется подобрать насос и назначить режим его работы.

Таблица 9. Определение полной высоты подъема воды, м (при $z=30$ м)

Показатели	При подаче насоса Q , м ³ /ч							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Понижение уровня в скважине	1	2	3	4	5	6	7	8
Потери напора в водоводе	—	0,24	0,5	0,87	1,32	1,76	2,4	3,1
Полная высота подъема воды	31	32,24	30,5	34,87	36,32	37,76	39,4	44,1

Прежде чем приступить к решению поставленной задачи методом графических построений, необходимо рассчитать характеристики всех элементов системы по соответствующим формулам. Результаты этих расчетов заносятся в табл. 9.

Далее по данным табл. 9 строят графики $Q-H$ элементов системы (рис. 32). Для подбора насоса необходимо знать величины H и Q .

Величина Q_T задана по условию задачи. Для определения величины H необходимо через точку $Q=Q_T$ провести линию, перпендикулярную оси абсцисс. На пересечении перпендикуляра с кривой полной высоты подъема воды находится точка, по которой определяется требуемый напор насоса. В данном случае величина $H=37,76$ м.

Насос подбирают по каталогу со значениями Q и H , лежащими в области оптимальных КПД. Для рассматриваемого примера таковым является насос марки ЭЦВ 10-63-40. Если перенести график характеристики $Q-H$ этого насоса на рис. 32, то будет видно, что при подаче воды в количестве $Q=60$ м³/ч он развивает напор $H=42,5$ м, т. е. больше, чем это требуется по расчету на величину Δh_g . Следовательно, для обеспечения $Q=Q_T$ необходимо задвижкой, установленной на напорной линии, сработать напор $\Delta h_g=4,74$ м. Если этого не сделать, то рабочая точка насоса сместится вправо по характеристике $Q-H$. При этом подача насоса увеличится до $Q_p=64,5$ м³/ч.

В уравнении (88) заданы величины z , S и Δh_b и лишь рабочая характеристика насоса $Q-H$ представлена графиком. Если характеристику насоса задать в виде функции $H=f|Q|$, то решение уравнения (88) можно получить аналитически.

Для большинства погружных насосов рабочая область характеристики $Q-H$ может быть описана уравнением

$$H = A - BQ^2, \quad (89)$$

где A и B — аналитические параметры характеристики $Q-H$ насоса.

Тогда после подстановки (89) в уравнение (88) получим:

$$(S_T + S_b + B) Q^2 + (Q/q) - (A - z) = 0, \quad (90)$$

а разрешая последнее относительно Q , будем иметь

$$Q_p = \left[\sqrt{\left(\frac{1}{q^2}\right) + 4(A - z)(S_T + S_b + B)} - \frac{1}{q} \right] / [2(S_T + S_b + B)], \quad (91)$$

где Q_p — подача скважин (насоса) при заданных гидравлических параметрах всех элементов систем.

Зная величину $Q=Q_p$, далее по формулам (86) — (88) вычисляют значения S , Δh_b и H .

Если требуется обеспечить заданную подачу воды от скважины в количестве $Q=Q_T$ путем регулирования подачи насоса задвижкой на напорной линии, то для определения расчетного значения Δh_d (где Δh_d — величина напора, дросселируемого задвижкой) уравнение (90) следует переписать в виде:

$$\Delta h_d = (A - z) - (S_T + S_b + B) Q_T^2 - \frac{Q_T}{q}. \quad (92)$$

При регулировании подачи насоса, чтобы обеспечить требуемое понижение уровня воды в скважине $S=S_T$, ве-

личину Δh_d также определяют по формуле (92), а значения Q_T устанавливают из условия $Q_T = qS_T$.

Формула (91) может быть использована и для прогноза режима работы «скважина—насос—водовод» при изменении условий на участке водозабора, а также за счет изменения гидравлических параметров отдельных элементов системы.

Пример 5. Скважина находится на расстоянии порядка 100 м от реки. Водоносный горизонт представлен хорошо промытыми гравийно-галечниковыми отложениями. Мощность водоносного пласта $m=54$ м. Коэффициент фильтрации пород $k=100$ м/сут.

В скважине установлен насос марки АТН-14, который в области оптимальных значений КПД обеспечивает подачу воды в количестве от 120 до 340 м³/ч. Аналитические параметры этого насоса: $A=17,3$ м и $B=0,44 \cdot 10^{-4}$ для Q , м³/ч. Вода от скважины в резервуар подается по водоводу $D=250$ мм и длиной $l=100$ м. Подземные воды на участке водозабора склонны к осадкообразованию. Поэтому необходимо дать прогноз режима работы системы «скважина — насос — водовод» с учетом кольматажа пород прискважинной зоны пласта. Помимо этого известен график колебания уровня грунтовых вод по месяцам года.

Расчеты по определению S и Q будем проводить по формулам (86) и (91). При вычислении значения q принято, что скважина является совершенной по степени вскрытия пласта $l_0/m=1$ (где l_0 — длина фильтра скважины), а величины фильтрационных сопротивлений определяются по известным формулам гидродинамики подземных вод с учетом фильтров скважин и кольматажа при эксплуатации и, в частности, по уравнениям, приведенным в главах VII и VIII.

В расчетах приняты: $k_f=100$ м/сут, $r_0=0,2$ м, $r_c=0,4$ м, $N_0/n=0,8$ и $\Delta \tau=0,3$ мес.

Графики на рис. 33, а позволяют проанализировать влияние роста дополнительного сопротивления $\zeta_\Phi(t)$, обусловленного кольматажем, на режим работы системы «скважина—насос—водовод». Как видно, с ростом $\zeta_\Phi(t)$ наблюдается уменьшение расхода скважины. При этом понижение уровня воды в самой скважине увеличивается, а понижение уровня в пласте и, в частности, на контакте с фильтром скважины уменьшается. Разность $S(r_0, t) - S(r_c, t)$ равна понижению, обусловленному кольматажем, и составляет

$$S(r_0, t) - S(r_c, t) = Q_l \zeta_\Phi(t) / 2\pi l. \quad (93)$$

Колебание уровня грунтовых вод также оказывает значительное влияние на режим работы системы. С повышением уровня грунтовых вод уменьшается геометрическая высота подъема воды из скважины, а при снижении — увеличивается. Вследствие этого кривая изменения во времени дебита скважины как бы повторяет график колебания уровня грунтовых вод (рис. 33, б). Графики $Q(t)$ и $S(t)$ на рис. 33, б построены в предположении, что $\zeta_\Phi(t) =$

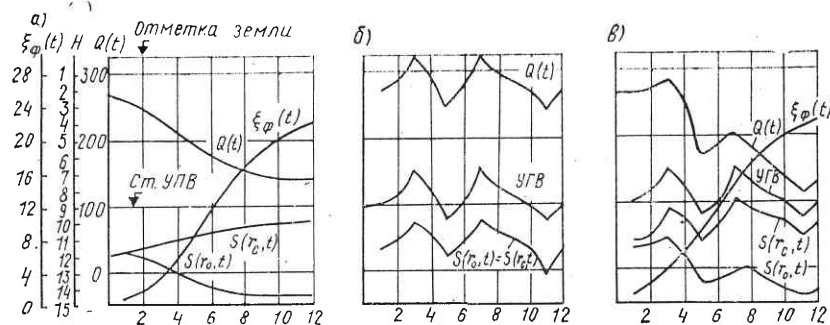


Рис. 33. Расчет режимов работы системы «скважина — насос — водовод»

$=0$, т. е. без проявления процессов колыматажа скважины.

На рис. 33, в графики $Q(t)$, $S(r_0, t)$ и $S(r_c, t)$ показывают случай, когда изменение режима работы скважины определяется одновременно проявлением процессов колыматажа и колебанием уровня грунтовых вод. Этот случай является наиболее характерным, так как чаще всего с ним приходится сталкиваться на практике.

3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМ ПОДАЧИ ВОДЫ ОТ СКВАЖИН

Методику гидравлического расчета систем подачи воды от скважин рассмотрим на примере водозабора, представленного в виде линейного ряда скважин, подающих воду в один сборный водовод (рис. 34). Примем, что скважины

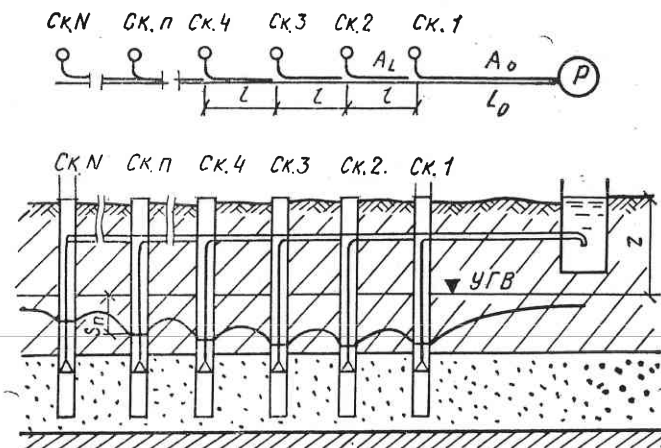


Рис. 34. Схема линейного ряда скважин при одном сборном водоводе

располагаются на одинаковом расстоянии друг от друга и действуют в условиях жесткого режима фильтрации. Применительно к этой схеме можно построить наглядную математическую модель, с помощью которой проиллюстрировать методы решения различных задач гидравлического расчета водозаборов подземных вод. Одной из таких задач является выбор марок насосов, обеспечивающих в скважине требуемый режим работы водозабора. Как указывалось выше, для этого необходимо знать расчетные дебиты скважин и величину требуемых напоров для подачи воды на заданную отметку.

По схеме рис. 34 напор, требуемый для подачи воды в количестве Q_n из любой n -й скважины на заданную отметку, составляет

$$H_n = z + A_0 L_0 \left(\sum_{j=1}^{N_0} Q_j \right)^2 + l \sum_{i=1}^{n-1} A_i \left(\sum_{j=1}^{N_0} Q_j - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j \right)^2 + S_n + l_{Tn} A_{Tn} Q_n^2, \quad (94)$$

где L_0 — расстояние от первой скважины до резервуара; A_0 — удельное сопротивление водовода на этом участке; A_i — удельное сопротивление водовода на i -м участке; l — расстояние между скважинами; n — номер скважины, для которой рассчитывается напор насоса; N_0 — общее число скважин в ряду; l_{Tn} — длина участка подсоединения скважины к сборному водоводу; A_{Tn} — удельное сопротивление водовода на этом участке; S_n — понижение уровня воды в n -й скважине, которое рассчитывается по известным формулам подземной гидравлики.

$$S_n = \frac{Q_n}{4\pi T} [R_n + \xi_{cn}(t)] + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^{N_0} \frac{Q_j}{4\pi T} R_{jn}. \quad (95)$$

Как известно, могут быть различные условия, которые следует выполнять в процессе эксплуатации водозабора, и, в частности, либо обеспечить подачу воды в заданном количестве Q_s (где Q_s — требуемая норма водопотребления), либо отобрать максимально возможное количество воды, поддерживая в скважинах уровень на отметках $S \cong S_{\text{доп}}$.

Если по условию задачи задан суммарный расход водозабора Q_s , то дебиты скважин первоначально, как правило, принимают одинаковыми и равными $Q_j = Q_s / N_0$. В этом случае напоры, требуемые для подачи воды из каждой скважины в количестве Q_j , рассчитывают по уравнению (94) для $n = 1, 2, 3, \dots, N_0$.

Если ставится задача отобрать максимально возможное количество воды, удовлетворив условию $S_j = S_{\text{доп}}$, то дебиты скважин и суммарная подача водозабора первоначально неизвестны. В этом случае дебиты скважин опреде-

ляют из решения следующей системы уравнений размерностью N_0 :

$$\sum_{j=1}^{N_0} \frac{Q_j}{4\pi T} R_{jn} = S_{n \text{ доп}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N_0. \quad (96)$$

В этой системе уравнений число неизвестных равно числу скважин (в каждом уравнении содержится N_0 неизвестных Q_j и таких уравнений N_0). В правой части каждого уравнения стоит $S_n = \text{const}$, заданная для n -й скважины. Решение этой системы уравнений относительно неизвестных Q_j можно получить методом Гаусса и лишь после этого приступить к определению H_j по уравнению (94) для всех N_0 скважин.

По известным значениям Q_j и H_j подбираются погружные скважинные насосы. При большом числе скважин выбор марок насосов целесообразно также автоматизировать. Для этого необходимо в памяти ЭВМ создать архив данных характеристик насосов, а насосы можно подбирать согласно следующему алгоритму:

Шаг 1. Для скважины с номером j выбрать значения Q_j и H_j .

Шаг 2. Из каталога насосов для i -го номера в порядке их записи ($i=1, 2, 3, \dots, N$, где N — число занесенных в каталог насосов) считать граничные значения $Q_{\min}$, $Q_{\max}$ (в области оптимальных значений q по характеристике $Q-\eta$) и соответствующие им значения $H_{\max}$, $H_{\min}$.

Шаг 3. Проверка выполнения условия $Q_{\max} \geq Q_j \geq Q_{\min}$. Если это условие выполняется, то переход к шагу 4, в противном случае к шагу 2 при $i=i+1$.

Шаг 4. Проверка выполнения условия $H_{\max} > H_j$. Если это условие выполняется, то переход к шагу 5, если нет, то к шагу 2 при $i=i+1$.

Шаг 5. По формуле (89) проводится вычисление H_{pi} при заданном значении Q_j . Величины A_i и B_i выбираются из каталога для данного насоса.

Шаг 6. Проверка выполнения условия $H_{pi} \geq H_j$. Если это условие выполняется, то переход к шагу 7, в противном случае к шагу 2 при $i=i+1$.

Шаг 7. Вычисляется $\Delta h_{ij} = H_{pi} - H_j$.

Шаг 8. Вычисляются затраты мощности N_i при установке n -го насоса в j -ую скважину и сравниваются с $N_{\text{зап}}$.

Если $N_i < N_{\text{зап}}$, то запись N_i в противном случае переход к шагу 2 при $i=i+1$.

В результате перебора $i=1, 2, 3, \dots, N$ по приведенному выше алгоритму подбирают водоподъемное оборудование для всех скважин, исходя из условия минимума затрат мощности и определяют необходимые величины дросселирования Δh_{ij} , при которых установки обеспечивают заданную подачу воды из скважин в количестве Q_j .

После того как осуществлен подбор насосных установок, необходимо провести расчет совместной работы всех элементов системы, так называемый проверочный расчет.

Необходимо определить следующее: фактические дебиты скважин и понижения в них уровня воды; напоры, развиваемые насосами, и в расчетных точках сети; расходы и потери напора в линиях водоводов. Поверочный расчет позволяет также оценить возможные отклонения в работе сооружений от заданных условий, что, как правило, имеет место в действительности.

Расчет совместной работы водозаборных сооружений и сооружений системы подачи воды от скважин проводят на основе математической модели водозабора, учитывающей реальные гидравлические характеристики всех элементов и их взаимосвязь. Применительно к схеме (рис. 34) математическая модель водозабора имеет вид [2]:

$$A_n - z - A_0 L_0 \left(\sum_{j=1}^{N_0} Q_j \right)^2 - l \sum_{i=1}^{n-1} A_i \left(\sum_{j=1}^{N_0} Q_j - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j \right)^2 - (l_{1n} A_{1n} - B_n) Q_n^2 - S_n - \Delta h_n = f_n, \quad (97)$$

где $n=1, 2, 3, \dots, N_0$; f_n — величина невязки в n -м уравнении; B_n — гидравлические сопротивления насоса.

Эта модель получена в результате подстановки уравнений характеристик (89) в систему уравнений (94).

Поскольку при подборе насосов было определено значение $\Delta h_{ij} = \Delta h_n$ для каждой скважины, то при обеспечении дросселирования этих напоров система будет находиться в равновесии. При этом величины Q_j , S_j и H_j в точности соответствуют заданным значениям. Однако как только изменится хотя бы один параметр по любому из элементов системы, произойдет смещение первоначального равновесия и, как следствие, перераспределится нагрузка между сооружениями.

Обычно скважины вводят в действие одновременно и с развитием водозабора строят новые линии сборных водоводов. В процессе эксплуатации водозабора наблюдается постепенное старение скважин. Одни скважины полностью выходят из строя и на месте их сооружаются новые, другие останавливают на время профилактического ремонта или для замены водоподъемного оборудования и снова включают в работу. Изменяются также и гидрогеологические условия на участке водозабора. Происходит кольматация русловых отложений и сработка запасов подземных вод, наблюдается непрерывное колебание уровней воды и т. п. Влияние всех перечисленных факторов на изменение режима работы скважин и сооружений системы подачи воды можно установить на основе решения системы уравнений (97). Более того, эта математическая модель по-

зволяет прогнозировать работу водозабора как единого гидравлического комплекса и обоснованно намечать различные мероприятия, направленные на повышение эффективности его работы.

Таким образом задача расчета режима работы водозабора сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений (97) относительно величины Q_j . Решить эту систему уравнений можно методом Ньютона или с помощью других итерационных методов.

При решении системы уравнений методом Ньютона можно воспользоваться следующей итерационной процедурой.

Шаг 1. Формируется массив значений Q_j , т. е. величин дебитов скважин.

Шаг 2. Вычисляются значения невязок f_n для $n = 1, 2, 3, \dots, N_0$. Если $f_n > \varepsilon_1$ (где ε_1 — заданная точность решения задачи), то переходят к шагу 3, в противном случае к шагу 5.

Шаг 3. Определяются поправочные расходы ΔQ_j из решения системы линейных уравнений вида:

$$f_n = 2 \left\{ A_0 L_0 \sum_{j=1}^{N_0} Q_j + l \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=1}^{N_0} Q_j - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j \right) \right\} \Delta Q_j + \sum_{j=1}^{N_0} \frac{R_{jn}}{4\pi T} \Delta Q_j + 2(l_{Tn} A_{Tn} + B_n) Q_n \Delta Q_n, \quad (98)$$

где $n=1, 2, 3, \dots, N_0$, которое может быть получено методом Гаусса,

Шаг 4. Проводится корректировка расходов Q_j всех скважин согласно выражению $Q_j = Q_j + \Delta Q_j$ и переход к шагу 2.

Шаг 5. Определяются величины S_j , H_j , а также расходы и потери напора в линиях и напоры в расчетных точках сети.

В предложенном алгоритме наиболее трудоемкая операция — это решение системы линейных уравнений на шаге 3. Эта задача может быть упрощена, если пренебречь в каждом из n уравнений системы членами, содержащими ΔQ_j смежных уравнений. Это позволяет получить достаточно простую формулу для вычисления поправочных расходов [2], оставив без изменения приведенный выше алгоритм решения задачи,

$$\Delta Q_n = f_n / 2 \left\{ A_0 L_0 \sum_{j=1}^{N_0} Q_j + l \sum_{i=1}^{n-1} A_i \left(\sum_{j=1}^{N_0} Q_j - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j \right) + (l_{Tn} A_{Tn} + B_n) Q_n + \frac{R_n + \xi_n(t)}{4\pi T} \right\}. \quad (99)$$

В практике расчета водопроводных сетей этот метод известен как метод Лобачева—Кросса. Он существенно упро-

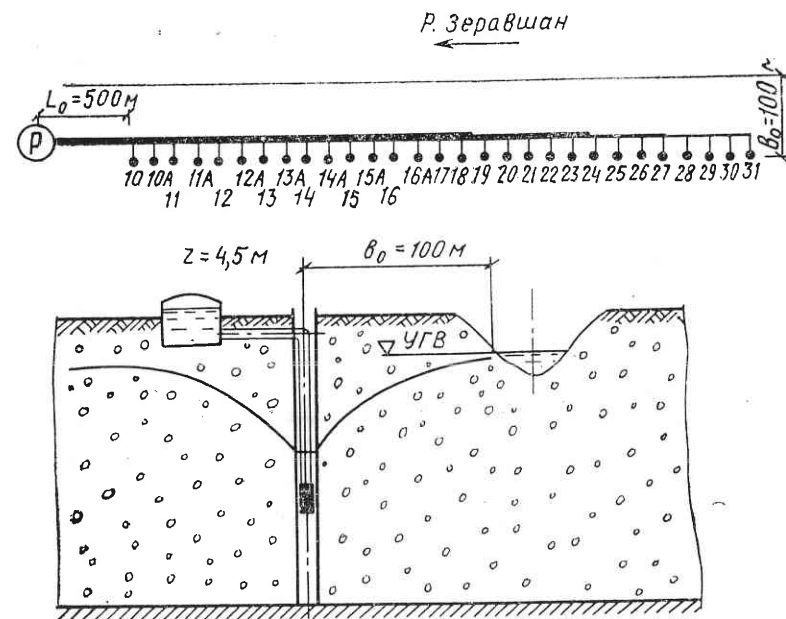


Рис. 35. Расчетная схема водозабора

щает вычисление величин ΔQ_j , но при этом увеличивается число последовательных приближений.

Пример 6. Водозабор в виде линейного ряда скважин запроектирован в долине горной реки. Водоносный горизонт на участке водозабора представлен гравийно-галечниковыми отложениями мощностью $m=27$ м. Коэффициент фильтрации пород равен $k=100$ м/сут. Скважины размещаются на расстоянии 100 м от уреза воды в реке и на расстоянии 110—125 м друг от друга. Схема подсоединения скважин к сборному водоводу приведена на рис. 35. Там же показана высотная схема подачи воды от скважин в сборный резервуар. Строительство водозабора предполагается осуществить в три очереди в следующей последовательности. Сначала ввести в действие первые восемь скважин с номерами 10, 11, 12 и т. д. по 17-ю включительно, пробуренные на расстоянии 220 м друг от друга. Затем между первыми восемью скважинами добурить промежуточные скважины II очереди строительства в количестве семи штук. Это скважины с номерами 10А, 11А, 12А и т. д. по 16А включительно. Таким образом, с пуском второй очереди расстояние между задействованными скважинами составит 110 м. Далее сооружают скважины III очереди с номерами 18, 19, 20 и т. д. по 29 на расстоянии 125 м друг от друга.

Проектная подача I, II и III очереди строительства водозабора принята $Q_I=50$ тыс. м³/сут, $Q_{II}=93,6$ тыс. м³/сут и $Q_{III} \approx 180$ тыс. м³/сут исходя из условия, что подача воды от каждой скважины составит 260 м³/ч. Для обеспечения таких расходов в скважинах предполагалось установить насосы марки АТН-14, которые в области оптимальных значений КПД обеспечивает подачу воды в количестве 120—340 м³/ч.

В табл. 10 приведены результаты расчета I и II очереди строительства водозабора. Из таблиц видно, что введение в действие

Таблица 10. Дебиты скважин Q и понижения уровня S воды для I и II очередей строительства

№ скважины	I очередь		II очередь	
	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$S, \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$S, \text{ м}$
10	357,012	6,71	340,09	6,39
10a	—	—	317,088	6,88
11	326,52	7,46	303,768	6,95
11a	—	—	294,408	7,01
12	314,244	7,68	287,28	7,03
12a	—	—	280,296	7,08
13	308,7	7,75	219,086	7,01
13a	—	—	215,976	6,99
14	315,288	7,5	288,996	6,74
14a	—	—	284,4	6,65
15	322,524	7,26	288,756	6,51
15a	—	—	294,912	6,32
16	333,936	6,91	299,088	6,19
16a	—	—	316,224	5,72
17	367,848	5,86	331,524	5,28

восьми скважин I очереди строительства водозабора позволяет осуществить подачу воды в резервуар в количестве 63,506 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, т. е. с превышением проектной нормы водопотребления на 13,506 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$. Фактически это означает, что одна из скважин может быть полностью зарезервирована.

С пуском II очереди строительства подача водозабора увеличивается до 103,420 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, продолжая превышать требуемую подачу воды на 9,8 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$. При этом наблюдается некоторое уменьшение подачи воды от ранее введенных в действие скважин I очереди. На этом этапе строительства водозабора их суммарная подача составляет уже не 63,506, а на 6,804 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ меньше.

Результаты расчетов III очереди строительства водозабора приведены в табл. 11.

При действии 29 скважин подача водозабора составляет 164,643, что на 15,360 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ меньше требуемой подачи воды. При этом скважины, расположенные на конце линейного ряда (№ 23—31), работают с неполной загрузкой. Их подача составляет от 130 до 226, в то время как должна быть равной подрядка 260 $\text{м}^3/\text{ч}$.

Для увеличения подачи водозабора с доведением ее до проектной мощности может быть предложен ряд различных мероприятий и, в частности, устройство системы ИВПВ, сооружение дополнительных скважин, замена водоподъемного оборудования и др.

По условиям на площадке водозабора инфильтрационные бассейны системы ИВПВ можно разместить лишь в районе скважин с номерами 12—17 на расстоянии 25—30 м (имеется в виду, что вода в реке, подаваемая в инфильтрационные бассейны, хорошего качества) в сторону от линии водозабора. Однако в этом случае устраивать систему ИВПВ оказывается малоэффективно. Гидравлическим расчетом установлено, что при расходе системы ИВПВ 36 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ общее увеличение дебита скважин без замены в них водоподъемного оборудования составляет всего 5,3 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, т. е. КПД системы очень мал ($\eta_{\text{п}} \approx 15\%$). Это объясняется тем, что введение в действие системы

Таблица 11. Дебиты скважин Q и понижения уровня S воды при отключенных и включенных бассейнах для III очереди

№ скважины	При отключенных		При включенных	
	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$S, \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$S, \text{ м}$
10	359,316	6,53	369,0	5,99
10a	325,44	6,91	348,156	6
11	302,76	6,96	331,128	5,89
11a	284,868	6,9	306,792	6,02
12	269,856	6,79	295,92	5,81
12a	255,096	6,75	286,704	5,64
13	248,22	6,55	274,464	5,58
13a	237,024	6,4	255,6	5,63
14	240,408	5,96	261,684	5,14
14a	229,068	5,81	262,116	4,87
15	236,268	5,58	255,204	4,79
15a	237,96	5,32	250,056	4,69
16	236,844	5,15	250,956	4,48
16a	251,388	4,68	268,812	3,92
17	263,016	4,29	265,5	3,87
18	266,184	3,97	261,72	3,73
19	262,908	3,85	256,824	3,66
20	256,32	3,71	249,588	3,55
21	251,1	3,6	244,08	3,44
22	241,848	3,44	234,936	3,30
23	225,9	3,21	218,384	3,09
24	214,416	3,02	208,188	2,91
25	189,936	2,72	184,536	3,62
26	179,42	2,55	174,312	2,46
27	167,364	2,39	162,612	3,31
28	195,91	2,61	190,152	2,52
29	150,59	2,11	146,34	2,03
30	142,34	1,92	138,42	1,86
31	131,44	1,67	127,944	1,61

ИВПВ повышает уровень грунтовых вод на линии водозабора всего примерно на 0,3—1 м, поэтому рабочие точки насосов лишь незначительно смещаются в сторону увеличения подачи и, кроме того, это наблюдается лишь по скважинам, находящимся около инфильтрационных бассейнов. Скважины же крайнего ряда, наоборот, уменьшили свою подачу воды.

Сооружение трех-четырёх дополнительных скважин позволяет компенсировать недостачу воды. Однако это решение увеличивает строительные затраты и не является наиболее рациональным. В данном случае для увеличения подачи водозабора необходимо в скважинах, расположенных на концевом участке водовода, предусмотреть установку более высоконапорного водоподъемного оборудования. В частности, в скважинах с номерами 23—31 следует заменить насосы марки АТН-14 на насосы ЭЦВП2-210-25.

Гидравлический расчет водозабора показал, что в этом случае подача крайних скважин возросла до 250—270 $\text{м}^3/\text{ч}$ и нагрузка на все скважины линейного ряда стала достаточно равномерной. Подача водозабора при этом составила 183,5 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$.

Приведенный материал иллюстрирует методику гидравлического расчета водозабора на примере одной простейшей схемы — линейный ряд скважин, работающих на один сборный водовод. В практике проектирования обычно приходится сталкиваться с более сложными схемами водозаборов. Поэтому для анализа режима работы таких систем на стадии проектирования и эксплуатации необходимо иметь соответствующее математическое обоснование для расчетов на ЭВМ.

Расчеты линейного ряда скважин проводились по программе «ГРСПВС».

Глава X. ПРОСТЫЕ СИСТЕМЫ ИВПВ III ТИПА (ОТКРЫТОГО)

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Кроме систем ИВПВ I и II типов с инженерными сооружениями и нередко с предварительным улучшением качества поверхностных вод для восполнения подземных применяют более простые способы инфильтрации поверхностных вод. Такие системы являются очень дешевыми, но использование их ограничено рядом условий и в первую очередь возможностями простой инфильтрации поверхностных вод в подземные, с относительно хорошим качеством поверхностных вод. Кроме того, в ряде случаев для этих систем необходимо наличие больших свободных площадей. Этот тип ИВПВ довольно широко применяется в СССР, впервые в 1901 г. был использован для водоснабжения г. Арзамаса. Он также распространен в США. В Западной Европе, где почти везде поверхностные воды сильно загрязнены, применяют один из вариантов подобной схемы ИВПВ и по существу промежуточный между I и III типами — это инфильтрация через поверхности естественных лугов или засаженные травой. В том случае, если питание водоносного горизонта при III типе ИВПВ не равномерно, динамический уровень воды у водозаборов изменяется и особенно значительно при питании раз в год во время паводков в реке и даже реже — раз в несколько лет. При таких условиях особенно важно найти экономичные методы работы насосов и, в частности, погружных электронасосов.

2. ЗАДЕРЖИВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА И УВЕЛИЧЕНИЕ ИНФИЛЬТРАЦИИ В ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ

При эксплуатации грунтовых вод с недостаточным питанием атмосферными осадками можно применить метод задерживания поверхностного стока, чтобы увеличить просачивание воды и питание водоносного горизонта. При недостаточной емкости этого горизонта для создания запасов подземных вод предусматривают инфильтрацию поверхностного стока в течение всего теплого периода года. Рассмотрим такой метод на примере объекта, работавшего по вышеприведенной схеме ИВПВ. В г. Арзамасе до 1901 г. для водоснабжения использовался на участке Мокрого оврага каптаж источника из неглубоких грунтовых вод с расходом примерно 50—60 м³/сут и менее в зависимости от времени года. Ф. Владимирский в 1901—1905 гг. осуществил там искусственное восполнение грунтовых вод. Ранее питание неглубоких грунтовых вод происходило на участке Мокрого оврага в основном весной и при достаточно обильных дождях. Для повышения питания подземных вод и увеличения емкостных запасов в грунтовых водах, особенно для зимнего периода, поперек небольшой плоской долины, по которой протекал ручеек в Мокром овраге, соорудили невысокие (до 0,5 м) земляные валики, задерживающие поверхностные воды; последние постепенно просачивались через поверхность, заросшую травой. Площадь инфильтрации составляла 3,5 км². Расход каптажа увеличивался примерно до 1250—3000 м³/сут в зависимости от времени года, т. е. стал больше в 6—25 раз. Увеличение годового расхода принималось из расчета просачивания $\frac{1}{3}$ количества осадков на водосборе. Это простой приближенный балансовый расчет. При поверочных расчетах автора этой работы коэффициент просачивания осадков получился около 0,2, т. е. не сильно отличался от принятого в расчетах Ф. Владимирского.

Модуль эксплуатационных запасов подземных вод до регулирования просачивания поверхностного стока составлял около 0,2 л/(с·км²), а после устройства плотинки повысился в среднем примерно до 2,5 л/(с·км²). Следует отметить, что по данным наблюдений до 1910 г. колебания расхода источника получились не больше 20—30%. Судя по некоторым расчетам Ф. Владимирского, вода отпускалась по 25 коп. за 1 м³ (очень дорого) из отдельных водоразборных пунктов. Это примерно по 10 коп. за бочку, что не считалось очень дорогой ценой, так как хорошая вода ценилась высоко.

3. ИВПВ В НЕШИРОКИХ ДОЛИНАХ ПРИ НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ВОДОНОСНОГО СЛОЯ И НЕДОСТАТОЧНОМ РАСХОДЕ РЕКИ В ОТДЕЛЬНЫЕ ПЕРИОДЫ

При нешироких речных долинах с относительно небольшой мощностью водоносного слоя и недостаточным расходом речного стока для непрерывного искусственного восполнения подземных вод создавать емкостные запасы при компактной системе ИВПВ невыгодно, а чаще и нерационально. В связи с этим целесообразно водозаборы размещать вдоль долины из расчета получить необходимую емкость запасов подземных вод для периодов, когда речной сток отсутствует или недостаточен. Такие условия встречаются не только в засушливых районах Казахстана и подобных ему, но также во влажном климате в относительно коротких по длине и узких долинах, но с дождевым питанием и резкими колебаниями речного стока, например по Черноморскому побережью Кавказа. В таких условиях водозабор подземных вод целесообразно располагать вдоль долины: при мощности водоносного слоя до 8 м в виде горизонтальной дрены (рис. 36) и при большей глубине в виде ряда скважин (рис. 37).

Выполним расчет по схеме рис. 36 продольного (расположенного вдоль долины) водозабора из дренажных труб на период отсутствия питания подземных вод. Сначала примем минимальную мощность $H_{\min}$ на краях полосы во-

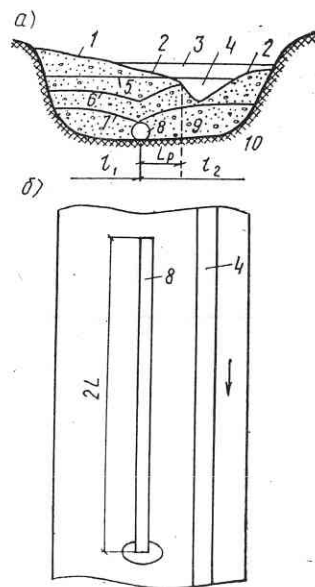


Рис. 36. Схема ИВПВ при фильтрации из русла реки, а также из поймы во время паводка с использованием регулирующей емкости водоносного горизонта в период отсутствия стока в реке. Водозабор горизонтальный из дренажных труб вдоль долины реки

а — поперечный разрез; б — план; 1 — надпойменная терраса; 2 — пойма; 3 — уровень воды в реке во время паводка; 4 — река; 5 — естественный уровень грунтовых вод при среднем расходе реки; 6 — уровень грунтовых вод при эксплуатации продольного горизонтального водозабора в период среднего уровня воды в реке; 7 — то же, при отсутствии расхода в реке; 8 — продольный горизонтальный водозабор из дренажных труб; 9 — водоносный горизонт в аллювиальных отложениях; 10 — водонепроницаемые породы — глины

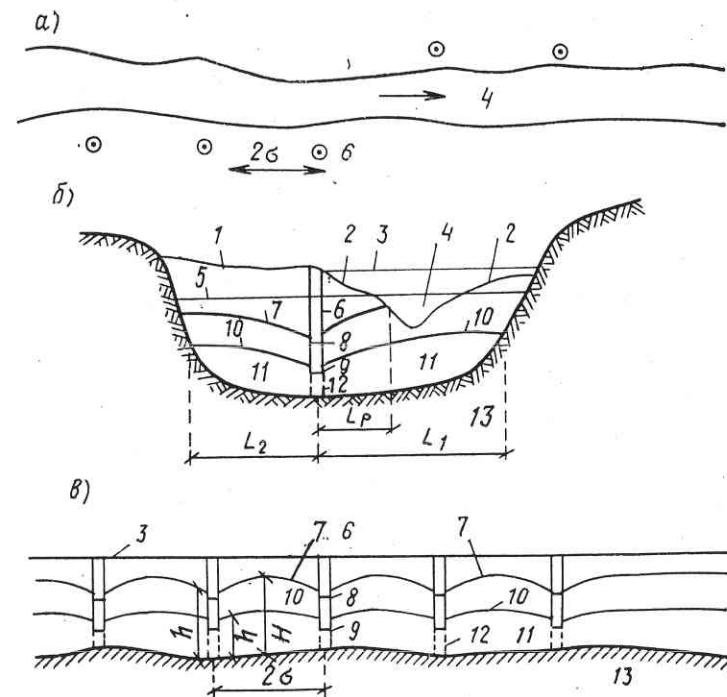


Рис. 37. Схема ИВПВ при фильтрации из русла реки, а также из поймы во время паводка с использованием регулирующей емкости водоносного горизонта в период отсутствия стока в реке. Водозабор из скважин вдоль реки

а — план; б — поперечный разрез; в — продольный разрез; 1 — надпойменная терраса; 2 — пойма; 3 — уровень воды в реке во время паводка; 4 — река; 5 — естественный уровень грунтовых вод при средних уровне и расходе реки; 6 — скважины; 7 — уровень грунтовых вод при эксплуатации продольного водозабора из скважин при среднем расходе реки; 8 и 9 — динамические уровни воды в скважине; 10 — самый низкий уровень грунтовых вод при отсутствии расхода в реке; 11 — водоносный горизонт; 12 — фильтр; 13 — водонепроницаемые породы

дозабора и $h_{\min}$ у дренажной трубы, а расположение горизонтального водозабора — посреди полосы, т. е. $l_1 = l_2 = l_{\text{ср}}$. При среднем коэффициенте фильтрации водоносного горизонта k и при длине горизонтального водозабора $2L$ расход его $Q_{\text{вг}}$ при указанных выше условиях будет

$$Q_{\text{вг}} = 2Lk \frac{H_{\min}^2 - h_{\min}^2}{l_{\text{ср}}} \quad (100)$$

При таком расходе водозабор может работать за счет емкостных запасов продолжительностью приблизительно t_e сут:

$$t_e = 2n_a L_{\text{ср}}^2 \left\{ 2H_{\min} \left[0,5 - \frac{1}{3} \frac{H_{\min}^3 - h_{\min}^3}{H_{\min} (H_{\min}^2 - h_{\min}^2)} \right] + \right.$$

$$+ (H - H_{\text{ср}}) \left\{ \frac{1}{k} (H_{\text{мин}}^2 - h_{\text{мин}}^2) \right\}, \quad (101)$$

где n_a — эффективная пористость.

При паводке, когда пойма заливается, расчет восполнения подземных вод ведется с учетом продолжительности затопления t_a , высоты слоя воды H_b (при большой ее величине), площади затопления и фильтрационных свойств почвы и пород, в особенности самого поверхностного слоя k_a ; приближенно для почвенного покрова с травой коэффициент фильтрации принимается около 0,1—2 м/сут [29]. Обычно инфильтрация происходит при двухслойной толще — верхний слой почвенный или другой с меньшим коэффициентом фильтрации и нижний с большим коэффициентом фильтрации. В этом случае изменением атмосферного давления под верхним слоем обычно пренебрегают, так как сроки инфильтрации невелики. Также нередко пренебрегают и капиллярным давлением в нижнем слое. Расчеты восполнения также делаются по скорости инфильтрации v_n , которая для почвенного покрова с травой принимается 0,1—2 м/сут. По рекомендациям Бизе и других авторов [20] скорости инфильтрации для травяных покровов рекомендуется принимать 0,2—0,6 м/сут.

При таких условиях время восполнения t_b можно приближенно определить по формуле

$$t_b = \frac{1}{v_n} (H_a n_a + H_{\text{вос}} n_{\text{вос}}), \quad (102)$$

где H_a и $H_{\text{вос}}$ — мощности верхнего слоя и восполняемого слоя; n_a ; $n_{\text{вос}}$ — недостаток насыщения в верхнем и восполняемом слоях.

При наличии заиленной пленки на самой поверхности земли следует учитывать ее сопротивление. В паводок, когда пойма не заливается, расчет восполнения запасов можно вести по обычному расчету притока из реки.

Пример 7. По схеме рис. 36 примем $2L=5000$ м, $l_{\text{ср}}=50$ м, $H=8$ м; $H_{\text{мин}}=3$ м; $h_{\text{мин}}=1$ м; $H_{\text{ср}}=2,5$ м; $H_a=2$ м, $K=10$ м/сут; $K_a=3$ м/сут; $n_{\text{вос}}=0,2$; $n_a=0,15$; требуемое t_p (по времени отсутствия питания должно быть 70 сут; площадь затопления поймы $500\,000$ м²). Скорость инфильтрации примем 3 м.

Требуется определить расход водозабора при минимальной мощности водоносного слоя $Q_{\text{вг}}$, продолжительность работы водозабора t_b за счет емкостных запасов и период восстановления t_a этих запасов.

По формулам (100) и (101) получим: расход

$$Q_{\text{вг}} = 5000 \cdot 10 \frac{3^2 - 1^2}{50} = 8000 \text{ м}^3/\text{сут},$$

продолжительность работы

$$t_e = \frac{2 \cdot 0,2 \cdot 50^2 \left\{ 2,3 \left[0,5 - \frac{1}{3} \cdot \frac{3^3 - 1^3}{3(3^2 - 1^2)} \right] + (8 - 2,5 \text{ м}) \right\}}{10 \cdot (3^2 - 1)} = 79,25 \text{ сут},$$

что больше 70 сут (по условию). Когда пойма заливается в половодье, допустимый период восстановления запасов подземных вод можно получить по формуле (102), имея в виду, что $k > k_a$ в 3,3 раза

$$t_b = \frac{1}{3} (0,5 \cdot 2 + 0,2 (8 - 2,5)) = 0,53 \text{ сут}.$$

Если расход реки будет меньше ($8000/0,53$) ($79,25/86400$) ≈ 14 м³/с, то за вышеуказанное время запасы подземных вод восполнены не будут. Практически время восполнения t_b нужно принимать несколько больше полученного по расчету примерно с коэффициентом 1,25—1,5 и расход реки тоже больше с таким же коэффициентом. При расходе реки меньше 14 м³/с соответственно увеличится продолжительность восполнения. Особенно целесообразен этот вариант расчета при продольном уклоне долины порядка 0,005 и более. При таких условиях можно запроектировать самотечные водоводы.

Приведенный вариант расчета с некоторыми изменениями формулы пригоден для расчета водозабора из скважин. Такой вариант водозабора с ИВПВ намечается построить для одного из объектов по Черноморскому побережью Кавказа.

4. ИВПВ В ДОЛИНАХ РЕК ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ ЕМКОСТИ ВОДОНОСНОГО СЛОЯ И НЕДОСТАТОЧНОМ РАСХОДЕ РЕКИ В ОТДЕЛЬНЫЕ ПЕРИОДЫ

Для ясного представления о влиянии инженерных сооружений на искусственное восполнение подземных вод сначала рассмотрим возможность использования природных условий. Возможность максимального использования природных условий для водоснабжения ряда объектов в восточной части Центрального Казахстана проанализировал В. Ф. Напеев (1975—1978 гг.). Фактический и возможный расход за счет восполнения подземных вод на нескольких участках определяется в 5,5 м³/с, т. е. значительный. При этом в маловодный период без дополнительных ранее созданных запасов подземных вод среднегодовой расход может быть получен всего 0,9 м³/с, а с учетом восполнения запасов в многоводные годы еще 4,6 м³/с (из расчета на весь период), а суммарно 5,5 м³/с. Таким образом, при восполнении подземных вод с использованием емкостных запасов подземных вод при многолетнем регу-

лировании расчетный расход может быть увеличен больше чем в 6 раз по сравнению с годичным регулированием. Полная емкость, занимаемая подземными водами в аллювиальных отложениях долин рек, составляет 2,5 км³, а полезная, используемая при многолетнем регулировании для отмеченного расхода, порядка 1 км³, т. е. 40%. Кстати, не весь емкостный запас может быть использован, исходя из условий допустимого понижения уровня скважин и неблагоприятных отдельных участков, но дальнейшее некоторое повышение использования емкостных запасов с их восполнением в данных условиях возможно, по-видимому, еще в размере 2—3 м³/с, но уточнение требует дополнительных исследований.

Расчет восполнения водоносного горизонта в данном случае можно выполнять балансовым, гидравлическим и гидродинамическим методами. Расчет водозаборов осуществляют гидродинамическим методом по обычным формулам. При этом учитывают, что инфильтрационное питание водоносного горизонта за счет просачивания атмосферных осадков и воды из русла реки в условиях эксплуатации отличается от естественных условий.

Эксплуатационные запасы подземных вод, т. е. обеспеченный дебит водозаборов, в данном случае складывается из инфильтрации атмосферных осадков (0,9 м³/с) и инфильтрации из реки в аллювиальные отложения (4,6 м³/с) за многолетний период.

Среднегодовое количество атмосферных осадков составляет 290 мм (за 40 лет), из них в расчет берутся зимне-весенние осадки (эффективные). Интенсивное их просачивание наблюдается при глубине залегания грунтовых вод 1—1,5 м; с увеличением этой глубины коэффициент просачивания уменьшается, и на глубине 5—6 м просачивание до водоносного слоя прекращается, так как вода идет на увеличение влажности зоны аэрации и затем испаряется. Следует учитывать, что при мощностях зоны аэрации меньше 1—1,5 м, хотя при просачивании и сокращается расход на увеличение влажности зоны аэрации, воды испаряется больше и в особенности через зону аэрации с поверхности грунтовых вод. Это проверено в данных условиях опытным путем. В разных условиях оптимальная мощность зоны аэрации будет меняться, но при эксплуатации подземных вод с понижением их уровня ниже оптимальной мощности зоны аэрации будет уменьшаться коэффициент инфильтрации эффективных осадков и при дальнейшем снижении уровня грунтовых вод может прекратиться питание их атмосферными осадками. В конкретных

условиях, конечно, это будет происходить по-разному. В частности, при наличии вертикальных хорошо проницаемых участков, например с рыхлыми породами при большом коэффициенте фильтрации, или еще лучше при наличии трещин питание подземных вод атмосферными осадками будет продолжаться и при мощности зоны аэрации 10—20 м и более. Таким образом, все это надо проверять в конкретных условиях и с учетом изменений при эксплуатации.

Наиболее важной статьей баланса питания аллювиальных отложений при оценке эксплуатационных запасов (расхода водозаборов) является инфильтрация речного стока, которая в рассматриваемом примере составляет в среднем около 82% суммарного баланса питания грунтовых вод. Расчет инфильтрации из реки ведется с учетом гидрологических, гидрогеологических и технических условий. Кроме того, не нужно забывать, что из водозаборов подземных вод следует получать воду хорошего качества. Гидрологические условия определяются изменчивостью расхода воды в реке. Есть реки, в которых на протяжении ряда лет, например 11 лет, сток бывает 1 раз в виде паводка продолжительностью несколько дней. Важны качество воды и фильтрационные свойства русла, которое бывает закольматировано с высоким гидравлическим сопротивлением.

Гидрогеологические условия определяются мощностью водоносного горизонта, шириной его полосы и протяженностью, коэффициентами фильтрации и активной пористостью, а также глубиной статического уровня воды.

Технические условия определяются схемой и конструкцией водозабора, его расположением и, в частности, расстоянием от реки, а также его расходом и положением динамического уровня воды. В период отсутствия питания гидравлический расчет водозабора в аллювиальном водоносном горизонте долины с непроницаемым дном и бортами полосы их распространения можно вести по зависимостям для пласт-полосы, а также для выделенных участков (закрытых блоков) каждой отдельной скважины, например для грунтовых вод, приближенно по формуле

$$S = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi k} \left[\ln \left(\frac{R_k}{r_0} \right) + \frac{2at}{R_k^2} - \frac{3}{4} \right]}, \quad (103)$$

где S — понижение уровня в скважине, м, через время t без дополнительных сопротивлений при входе в скважину; H — мощность водоносного слоя, м; Q — дебит скважины, м³/сут; k — коэффициент фильтрации водоносного слоя, м/сут; R_k — приведенный радиус окружности, м, равный около $0,57\sqrt{F}$; F — площадь, в которой расположена отдельная скважина, м²; r_0 — радиус скважины; a — коэффициент уравни-

проводности, $\text{м}^2/\text{сут}$; t — время, когда питание водоносного горизонта отсутствует, сут.

Расчет восполнения водоносного горизонта из реки в период паводка можно вести гидродинамическим методом по уравнениям неустановившегося движения, а также гидравлическим методом. В. Ф. Напеев (1979 г.) разработал следующую схему расчета. По данным изысканий получены гидрологические и гидрогеологические параметры. Кроме того, принята схема водозабора при его эксплуатации. Восполнение моделировалось в трех вариантах на гидроинтеграторе В. С. Лукьянова при сработках мощности водоносного горизонта 0,25; 0,5 и 0,7 первоначальной мощности водоносного слоя.

Результаты моделирования проверяли и сравнивали с имеющимися фактическими данными. Отклонения не превышали 3—5%, т. е. получалась высокая точность. На основании моделирования построен график изменения удельного поглощения поверхностного стока воды, т. е. расход поглощения на 1 м длины русла и на 1 м превышения уровня поверхностных вод над подземными. Таким образом, сделан переход к простому гидравлическому расчету восполнения подземных вод. Сравнение расчетного удельного поглощения с фактическими данными составило 8—10%. С помощью моделирования установлена обеспеченность работы водозабора из двух линейных рядов скважин при расстоянии между ними 1 км.

При условиях, рассмотренных выше, восполнение подземных вод осуществляется без специальных инженерных сооружений, но этот метод восполнения отличается от естественного тем, что приходится восполнять значительные запасы подземных вод, использованные в периоды между восполнением для водоснабжения и орошения. Таким образом, проанализированные условия приближаются к ИВПВ с максимальным использованием естественных условий.

Пример 8. Рассчитывается линейный водозабор из скважин, расположенный вдоль долины в период отсутствия питания водоносного горизонта. Горизонт приурочен к аллювиальным отложениям, подстилаемым снизу и с боков водонепроницаемыми породами. Требуется определить понижение уровня воды около скважин.

Дано. Ширина полосы водоносного слоя 1000 м; длина водозабора $2L=5000$ м; расстояние между скважинами 500 м; дебит скважины $Q=4000$ $\text{м}^3/\text{сут}$; начальная мощность водоносного слоя $H=30$ м; коэффициент фильтрации $k=50$ м/сут, радиус фильтра скважины — 150 мм; продолжительность работы водозабора без подпитывания водоносного горизонта $t=330$ сут; коэффициент уровнепроводности $a=3000$ $\text{м}^2/\text{сут}$.

Воспользуемся формулой (103), где

$$R_k = 0,57 \sqrt{1000 \cdot 500} = 403 \text{ м},$$

и после подстановки получим

$$S = 30 - \sqrt{30^2 - \frac{4000}{3,14 \cdot 50} \left[\ln \left(\frac{403}{0,15} \right) + \frac{23000 \cdot 330}{403^2} - \frac{3}{4} \right]} = 10,1 \text{ м},$$

Кроме того, нужно учесть понижение уровня воды от дополнительных сопротивлений при входе в скважину и в скважине. Эти дополнительные сопротивления установлены опытным путем и составляют 1,4 м; кстати, это более надежно, чем теоретические расчеты указанной величины. Таким образом, полное понижение составит $10,1 + 1,4 = 11,5$ м; в запас расчета надо принять около 2—3 м.

5. УЛУЧШЕНИЕ ПИТАНИЯ БЕРЕГОВЫХ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОДОЗАБОРОВ ПРИ ЗАИЛИВАНИИ РУСЛА РЕКИ

В СССР более 35% использования подземных вод приходится на береговые инфильтрационные водозаборы, получающие воду из аллювиальных отложений. В такие отложения фильтруется поверхностная вода через русло реки. При этом обычно происходят кольматация русла, увеличение гидравлических сопротивлений и уменьшение расхода водозабора или снижение динамических уровней в нем. Кольматация русла и интенсивность ее при эксплуатации водозаборов происходят по-разному в зависимости от гидрологических условий и от выбора участка указанного водозабора. Так, при расположении водозабора около размываемого или периодически размываемого русла реки кольматация будет меньше или ее даже почти не будет по сравнению с участками неразмываемых русел или с аккумуляцией отложений. Первые 10—30 лет влияние кольматации часто незаметно, но затем кольматация усиливается, а в результате фильтрации и работы водозабора происходит даже отрыв уровня грунтовых вод от русла реки.

Такое явление, например, наблюдалось на береговом инфильтрационном водозаборе на р. Сочи. Первые 25 лет влияние кольматации не замечалось; при этом расход водозабора постепенно возрастал до 110—120 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$. Но через 30—40 лет при меженных расходах реки стало наблюдаться сильное снижение динамических уровней, а затем и дебита до 60—70 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, т. е. почти вдвое. В связи с этим в 1971 г. было предложено и осуществлено мероприятие по увеличению фильтрационных возможностей русла. Бульдозером рыхлили верхнюю часть русловых отложений и создали небольшой подпор в русле, устроив несколько поперечных невысоких (0,3 м) заграждений, что-

бы увеличить площадь инфильтрации. Такое мероприятие по увеличению восполнения подземных вод оказалось весьма эффективным и расход водозабора стал прежний. Кроме того, снизилась себестоимость воды. Однако полученный расход водозабора с годами снижался, так как промывка заиливающего материала при рыхлении закольматированных русловых отложений при малых расходах реки в межень была недостаточной. Создание подпора в реке вело к увеличению живого сечения ее, еще большему снижению скорости течения воды и в результате к выпадению заиливающего материала. Указанное мероприятие очень дешевое; если удалять кольматирующий материал, то эффективность его можно сохранять длительный срок. Для этого надо производить рыхление в русле реки в период ее повышенных расходов, но при небольшой еще мутности. Декольматация русловых отложений рассматривалась также для районов Сибири А. Ф. Порядиным [23].

Следует отметить, что рыхление русла реки следует проводить не на всю глубину закольматированного слоя. В долине р. Сочи, например, когда сняли закольматированный слой, в скважинах берегового водозабора бактериальные показатели сразу ухудшились (по сравнению с нормами ГОСТ 2874—73). В каждом конкретном случае глубину рыхления следует обосновывать и по санитарным соображениям рыхлить рекомендуется на глубину не более $\frac{2}{3}$ закольматированного слоя; исключения для отдельных случаев должны быть обоснованы. Увеличение питания береговых инфильтрационных водозаборов из реки можно получать также путем понижения уровней грунтовых вод в водозаборах. Выше было отмечено, что в долине р. Сочи при кольматации русла для сохранения расхода водозабора раньше осуществляли дополнительное понижение уровня.

6. ИВПВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОНИЖЕНИЙ В РЕЛЬЕФЕ И СТАРИЦ В ДОЛИНАХ РЕК

При восполнении подземных вод в аллювиальных отложениях для поверхностной инфильтрации речных вод можно использовать понижения и старицы на пойменной террасе, заливаемые в паводок. Такие понижения и старицы можно заливать в период паводка и в его отсутствие, накачивать воду насосами из реки или при достаточных продольных уклонах долины, подавать воду самотеком по каналам или трубам и забирать воду из реки выше по течению. Воду можно подавать и на первую надпойменную террасу. Гидравлические расчеты для решения таких задач

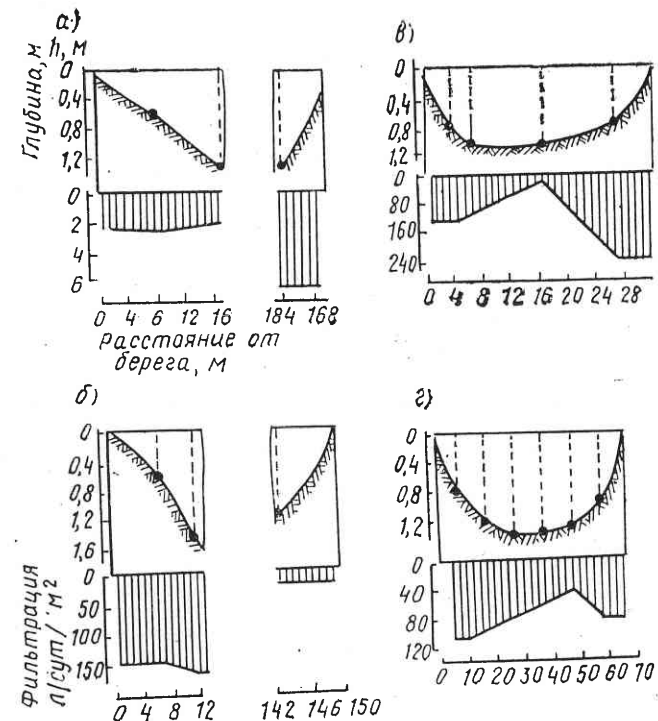


Рис. 38. Фильтрационные свойства донных отложений озер по четырем профилям

общезвестны. Старицы и понижения в рельефе работают как инфильтрационные бассейны. Понижения в рельефе могут обваловываться для увеличения их емкости. При кратковременном заполнении стариц уровни в них понижаются аналогично бассейнам при опоражнивании.

Фильтрационные свойства дна стариц обычно не высокие, и даже начальные скорости инфильтрации не превышают 0,05—0,2 м/сут. В естественных бассейнах растут водные растения, которые поддерживают фильтрационные свойства дна, разрыхляя его корневой системой. По такой схеме фактически осуществляется восполнение подземных вод на двух участках среднего течения Северского Донца.

По данным А. В. Чебанова, при средней скорости инфильтрации 0,04 м/сут на одном из участков происходит восполнение подземных вод с расходом 14 тыс. м³/сут. Мощность слоя илистых отложений дна озер составляет 0,2—0,7 м. Фильтрационные возможности этих отложений меняются у разных берегов и по площади озера (рис. 38). Они обычно больше у берегов и меньше к середине. В озерах скорость инфильтрации ближе к берегу 0,002—0,250,

а в средней части 0,001—0,037 м/сут, т. е. в средней части озер в 2—7 раз меньше, чем у краев. Кстати, фильтрационные свойства дна р. Северского Донца в том же районе изменяются от 0 до 0,5 м/сут в разных створах и точках створа. Таким образом, наблюдаются сильное заиливание и кольматация русловых отложений реки, а также дна озер.

Коэффициент фильтрации илистых отложений озер в долине среднего течения Северского Донца колеблется примерно от 0,2 до 0,001 м/сут. Коэффициент использования η_k при таких условиях составляет около 0,7, а себестоимость воды, по данным А. В. Чебанова, 0,06 коп. за 1 м³ (франко-водозабор).

После наполнения водоема (пруда, озера) и прекращения подачи воды рассчитывают время его опоражнивания, которое можно подсчитать, исходя из следующих соображений. Пусть площадь водоема F_v , средняя начальная высота слоя воды h_v , мощность илистой пленки и сильно закольматированного грунта m_n со средним коэффициентом фильтрации k_n по величине меньше скорости инфильтрации. Залегающий ниже грунт имеет коэффициент фильтрации больше скорости фильтрации.

Полный напор h_n получим из выражения

$$h_n = h_v + m_n + h_k, \quad (104)$$

где h_k — высота капиллярного поднятия; h_v — высота вакуума в грунте ниже закольматированного слоя со знаком «+», а при повышении давления со знаком «—».

Высоту капиллярного поднятия h_k подстилающего грунта можно определить приближенно по формуле (В. М. Шестаков, 1964 г.):

$$h_k = 0,4/\sqrt{k}, \quad (105)$$

где k — коэффициент фильтрации подстилающего грунта.

Величина h_k по формуле (105) несколько завышена; точнее можно определять ее опытным путем, но это сложно, а в связи с известной случайностью отбора проб тоже не точно.

Время опоражнивания t_0 можно определить по формуле

$$t_0 = \frac{m_n}{k_n} \ln \frac{h_v}{h_1}, \quad (106)$$

где h_v — начальная высота напора в водоеме; h_1 — высота оставшегося напора в водоеме.

Пример 9. Определяем время опоражнивания водоема.

Дано: $m_n=0,2$ м, $k_n=0,04$ м/сут; $h_1=0,01$; $h_v=1$ м, площадь фильтрации водоема 7 га.

В формулу (106) подставляем данные и получаем

$$t_0 = \frac{0,2}{0,04} \ln 100 = 23 \text{ сут.}$$

Расход профильтрованной воды Q_v без учета фильтрующих откосов составит $Q \approx 7 \cdot 10^5$ м³. Подобную задачу можно решать и при фильтрующих откосах.

7. ПОПУТНОЕ ИВПВ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

При устройстве ряда гидротехнических сооружений (водохранилищ, каналов и др.) в результате изменения условий взаимодействия поверхностных и подземных вод эксплуатационные запасы последних могут увеличиваться за счет поверхностных вод, а в ряде случаев прежние соленные грунтовые воды вытесняются инфильтрационными пресными поверхностными водами.

Например, в результате строительства Волжской гидроэлектростанции имени В. И. Ленина по левому берегу р. Волги выше плотины значительно поднялся уровень грунтовых вод в песчано-гравийных отложениях и значительно увеличились их эксплуатационные запасы. В связи с этим оказалось возможным устроить несколько водозаборов грунтовых вод с большим расходом для водоснабжения.

По данным в работах Г. Г. Коваленко и других (1974—1978 гг.) интерес представляет ИВПВ с Жартасским водозабором. На р. Шерунайбуры устроено Топарское водохранилище с многолетним регулированием за счет паводков. Ниже его по реке сооружена земляная плотина без противофильтрационного зуба и образовано Жартасское водохранилище, которое используется для орошения, а также для ИВПВ в аллювиальных отложениях. Жартасское водохранилище в основном питается за счет Топарского водохранилища. Аллювиальный водоносный горизонт приурочен к песчано-галечниковым отложениям с коэффициентом фильтрации $k=60$ —250 м/сут, коэффициентом водоотдачи $n_v=0,2$ —0,23 и коэффициентом удерживания $(4,5-5) \cdot 10^3$ м²/сут. Мощность водоносного горизонта в центральной части долины 13—20 м и к бортам уменьшается до 3—5 м. Сверху водоносный горизонт перекрывается суглинками и супесями мощностью 0,5—1,5 м с коэффициентом фильтрации 0,1—0,6 м/сут, что в санитарном отношении положительно.

Водозабор расположен в 400 м ниже указанной земляной плотины параллельно ей и состоит из 14 скважин. Рас-

стояние между скважинами 100—300 м. Фильтрация под плотиной, а также отдельные попуски из водохранилища создают искусственное восполнение подземных вод. Вода получается хорошего качества с колебаниями температуры около 4,5°C. При устройстве каналов и фильтрации воды из них формируются потоки грунтовых вод, которые могут вытеснять соленые подземные воды.

Таких примеров в Средней Азии много. В районе Каракумского канала в ряде мест получены большие эксплуатационные запасы грунтовых вод. Расчеты ИВПВ за счет питания из каналов и водохранилищ делаются аналитически в соответствующих случаях как для I типа, а также с учетом опыта по наблюдениям за инфильтрацией из каналов и водохранилищ в подземные воды.

8. РАСЧЕТ ЕМКОСТНЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В КОНУСЕ ВЫНОСА В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИХ ПРИ РАЗНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДАХ С ВОСПОЛНЕНИЕМ

Для эксплуатации подземных вод весьма перспективны водоносные горизонты в конусах выноса, в которых к тому же аккумулируются большие емкостные запасы воды.

При эксплуатации подземных вод в конусах выноса главной задачей является получение необходимых эксплуатационных запасов. При выборе участка фиксируется внимание на таких показателях, как глубина уровней воды в его различных частях, водопроводимость, расстояние, на котором он находится от потребителя, и др.

Для оценки возможностей использования накопленных запасов подземных вод приведем пример методики расчета их баланса для одного из конусов выноса. В табл. 12 приведены данные о питании и стоке подземных вод на конусе выноса. Принято, что подземный приток к конусу выноса из высокогорной части бассейна практически отсутствует, а подземный сток за пределы зоны выклинивания ничтожен. При таких допущениях разница между приходом и расходом за год получилась $25,1 - 22,3 = 2,8 \text{ м}^3/\text{с}$, т. е. около 12%. Отношение максимума к минимуму в течение года (по среднемесячным данным) составляет для питания 16,7 и для стока 3,9. Таким образом, при весьма неравномерном питании мы имеем значительно более равномерное расходование подземных вод. Это показывает, что водоносный горизонт обладает высокой аккумулирующей способностью.

Для определения регулирующей емкости водоносного горизонта возьмем годовую величину питания равной величине подземного стока; средняя их величина будет $(25,1 + 22,3)/2 = 23,7 \text{ м}^3/\text{с}$.

В соответствии с этим изменением ежемесячные величины питания и стока будем соответственно пропорционально уменьшать (для питания) и увеличивать (для стока). Величину аккумулирующей способности водоносного горизонта (его регулировочных запасов) можно подсчитать аналитически и графически по интегральным кривым.

Аналитический подсчет регулировочных запасов приведен в табл. 13.

В гр. 4 и 5 приводится разница между питанием и подземным стоком. С июня начинается период накопления регулировочных ресурсов; этот период продолжается четыре месяца до октября. Затем происходит постепенное снижение накопленных регулировочных ресурсов, количество которых полностью используется к маю на подземный сток. Наибольшее количество регулировочных ресурсов будет в сентябре. Графически подсчет регулировочных ресурсов приведен на рис. 39. Питание и подземный сток даны здесь в виде интегральных кривых. Сумма ординат ab и cd указывает на величину регулировочных ресурсов $179,6 \text{ м}^3/\text{с}$. Принимая по табл. 13 и рис. 39 секундный расход с округлением в

Таблица 12. Баланс накопленных запасов подземных вод в конусе выноса (в $\text{м}^3/\text{с}$)

Наименование	Месяцы												Среднее за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Питание подземных вод в зоне поглощения Выклинивание (сток) подземных вод	6,58	4,79	4,34	9,08	9,40	49,50	73,25	79,05	43,16	8,11	6,6	8,13	25,1
	28,3	31,5	33,28	27,25	16,19	12,37	10,6	10,84	14,98	21,11	28,6	32,77	22,3

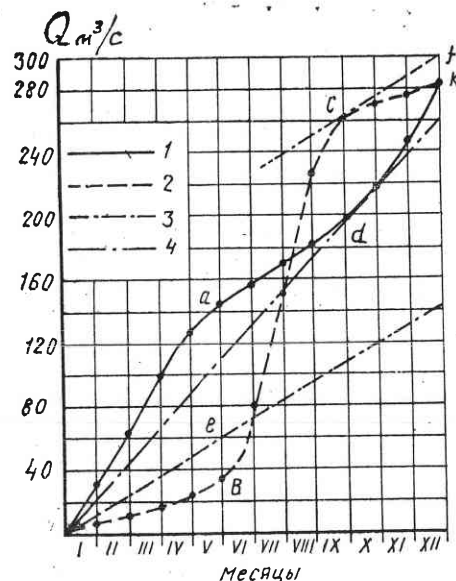


Рис. 39. Определение регулирующей емкости водоносного слоя по интегральным кривым

1 — кривая подземного стока; 2 — кривая равномерного естественного стока; 3 — кривая равномерной эксплуатации с расходом 12 м³/с; 4 — кривая равномерной эксплуатации с расходом 22 м³/с.

Примечание. Регулирующая емкость в естественных условиях определится как сумма ординат ab и cd , которая составляет 179,6 м³/с. При равномерной эксплуатации полезная регулирующая емкость равна сумме ординат eb и fk , т. е. 40 м³/с (естественное питание не изменяется)

земного стока часто бывают весьма велики.

Подсчет регулировочных запасов можно сделать и при неравенстве между собой в течение года величин питания и стока (отбора), но тогда расчет следует производить в многолетнем разрезе и лучше с учетом дополнительных факторов (испарение, транспирация и пр.). В условиях эксплуатации подземных вод с их восполнением величину регулировочных запасов обычно определяют исходя из того, что такие запасы периодически срабатываются, а затем восстанавливаются.

В данном примере, особенно в последнем случае, равномерный отбор подземных вод обеспечивается в другие периоды их восполнением за счет поверхностного стока. Следует также отметить, что при усиленной эксплуатации подземных вод увеличивается и их восполнение по сравнению с естественными условиями. В случае недостаточных

179,6 м³/с получим регулировочную емкость $179,6 \cdot 86\,400 \cdot 30 = 465\,523\,200 \text{ м}^3$.

Если из водоносного горизонта отбирать равномерно 12 м³/с, что близко к минимальному подземному стоку, регулирующие запасы без изменения условий питания будут равны сумме ординат eb и fk , т. е. $40 \cdot 86\,400 \cdot 30 = 103\,680\,000 \text{ м}^3$. Если принять равномерный расход 22 м³/с, то их можно получить, даже не изменяя естественные возможности питания водоносного горизонта, а регулировочные расходы аналогично предыдущему примеру составят ~500 млн. м³. Расчет показывает, что естественные возможности водоносных горизонтов по регулированию под-

Таблица 13. Сток и регулировочные запасы

Месяцы	Питание*, м³/с	Подземный сток*, м³/с	Поступление в водоносный горизонт, м³/с	Сток из водоносного горизонта, м³/с	Регулировочные запасы**, м³/с
1	2	3	4	5	6
I	6,23	30,07	—	23,84	88,75
II	4,53	33,76	—	28,93	59,82
III	4,12	35,36	—	31,24	28,58
IV	8,59	28,96	—	20,37	8,21
V	8,89	17,1	—	8,21	0,0
VI	46,75	13,14	33,61	—	33,61
VII	69,19	11,25	57,94	—	91,55
VIII	74,67	11,52	63,15	—	154,7
IX	40,77	15,91	24,86	—	179,56
X	7,67	22,43	—	14,76	164,80
XI	5,3	30,38	—	25,08	139,72
XII	7,69	34,82	—	37,13	112,59
Итого за год	284,4	284,7	179,56	179,56	

* Исходные данные взяты из работы М. А. Шмидта. Методика и расчеты автора.

** Регулировочные запасы в табл. 13 и на рис. 39 выражены в среднемесечном секундном расходе (для промежуточного расчета).

фильтрационных возможностей поверхностной инфильтрации ее улучшают. Указанный выше способ использования подземных вод можно отнести к III типу ИВПВ.

Глава XI. ИВПВ С ИНФИЛЬТРАЦИЕЙ ЧЕРЕЗ ЛУГОВЫЕ ПЛОЩАДИ И ТРАВЯНЫЕ БАССЕЙНЫ

Методы ИВПВ с инфильтрацией через травяные бассейны и луговые площади рассматриваются отдельно от выделенных ранее I и III типов ИВПВ с поверхностной инфильтрацией. В одних случаях система травяных бассейнов может включаться в их системы как сложная система предварительной и последующей водоподготовки, а в других — в системах с травяной поверхностью — используется более плохая по качеству вода по сравнению с требованиями к воде для I и III типов ИВПВ, не проводится предварительная и последующая водоподготовка, кроме хлорирования. Системы ИВПВ с инфильтрацией через травяные покровы могут быть очень простыми (близкими к III типу) и более сложными (близкими к I типу).

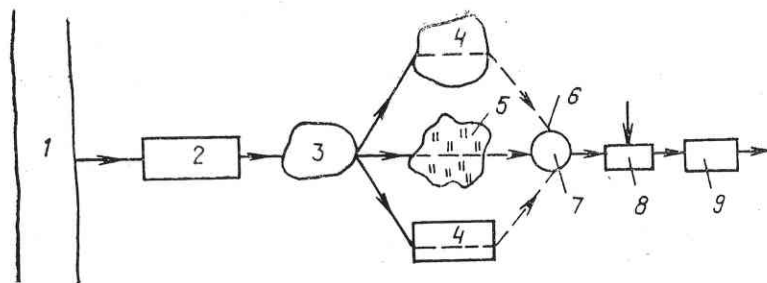


Рис. 40. Схема ИВПВ «Визенбург» (г. Цвиккау)

1 — р. Мульда; 2 — отстойник 3 — накопительный пруд; 4 — инфильтрационные песчаные бассейны; 5 — травяные бассейны; 6 — дренаж; 7 — сборная камера с погружными электронасосами; 8 — последующая очистка (аэрация и известкование); 9 — обезжелезивание и удаление марганца на скорых фильтрах

Последнее время в ГДР получают распространение системы ИВПВ с инфильтрацией поверхностных вод через естественные травяные покровы и искусственные травяные бассейны. Развитие этих систем определяется меньшими капиталовложениями при их сооружении и низкой эксплуатационной себестоимостью воды по сравнению с песчаными бассейнами. Кроме того, используется способность ряда растений усваивать вредные и нежелательные компоненты в исходной поверхностной воде. Особенно целесообразно использовать травяные бассейны у нас в СССР в южных районах, а также в районах с относительно небольшими потребностями в воде—5000—10 000 м³/сут, когда механизация регенерации песчаных бассейнов оказывается невыгодной. С развитием техники такое положение может измениться.

По данным В. М. Берданова (1979 г.), для ГДР удельные капиталовложения (на 1 м³/сут) на инфильтрационные сооружения для системы ИВПВ с расходом 43 тыс. м³/сут для травяных бассейнов меньше, чем для песчаных бассейнов примерно в 4 раза при скоростях инфильтрации 1—2 м/сут. Эти скорости приняты для сравнения работы разных бассейнов. В эксплуатации же травяных бассейнов скорости инфильтрации составляют в теплый период года 3—4, а в зимний—1—2 м/сут. Травяные инфильтрационные бассейны делают неглубокие—не более 0,8—1 м с учетом, что слой воды в них зимой составляет около 0,5 м (в ГДР зимой толщина льда небольшая). На некоторых объектах ГДР травяные бассейны применяются при небольшой мощности водоносного слоя, например в системе ИВПВ «Визенбург» (г. Цвиккау). Схема системы ИВПВ «Визенбург» (рис. 40) и ее работа описаны В. М. Бердано-

вым (1979 г.). Вода из р. Мульды по каналу самотеком поступает на предварительную водоподготовку в открытый горизонтальный отстойник; при этом для усиления коагуляции в смесителе перед отстаиванием вводится FeCl₃. После отстойника вода насосом подается в накопительный пруд и затем в инфильтрационные бассейны — песчаные и травяные. Под бассейнами на глубине 2 м заложен горизонтальный дренаж. Затем вода собирается в сборный колодец глубиной 4 м, откуда погружными электронасосами подается в систему последующей очистки: с предварительным известкованием для повышения pH на аэрацию и скорые песчаные фильтры для обезжелезивания и удаления марганца. В табл. 14 приведено сравнительное изменение качества воды, получаемой после песчаных и травяных инфильтрационных бассейнов.

Исходная вода из р. Мульды в обоих случаях — при подаче на песчаные инфильтрационные бассейны (I случай) и на травя-

Таблица 14. Сравнительное изменение качества воды в системе ИВПВ «Визенбург» (г. Цвиккау)

Соединение, мг/л	Песчаные бассейны				Травяные бассейны			
	р. Мульда	после отстойника	накопительный пруд	после инфильтрационного бассейна	р. Мульда	после отстойника	накопительный пруд	после инфильтрационного бассейна
CO ₂ свободная	9,9	20,9	23,1	39,6	7,7	14,9	20,9	44,6
O ₂ растворенный	10,9	12,9	11,1	2,6	5,4	5,3	4,5	2,1
Окисляемость:								
KMnO ₄	76	55	32,8	5,4	38	17	17,3	4,6
NH ₄	1,2	1,2	1,8	0	0,3	0,24	0,14	0,17
NO ₂	0,05	0,05	0,06	0	0,07	0,05	0,04	Следы
NO ₃	4,5	7	6,5	3,5	11	9	4,5	2,5
PO ₄	—	—	—	—	Следы	0	—	—

ные бассейны (II случай) — несколько отличалась. Судя по табл. 14 для I случая исходная вода имела значительно большую окисляемость в (2 раза) и большее содержание растворенного кислорода (в 2 раза), чем для II случая. По результатам улучшения качества воды травяные бассейны в общем работают примерно так же, как и песчаные бассейны, но несколько хуже по окислению соединений NH_4 и лучше по окисляемости. Работу травяных бассейнов в данном случае легко, просто и дешево улучшить надлежащей аэрацией. Песчаные и травяные инфильтрационные бассейны в рассматриваемом случае работали хорошо по значительному снижению окисляемости, увеличению содержания углекислоты и другим показателям, что видно из табл. 14. Для травяных бассейнов пригоден ряд растений — пырей, рогоз, двукосточник тростниковый, болотица луговая, полевая белая метеолица, озерный камыш, плел, манник и др.

В ГДР для некоторых трав допускается сброс воды целлюлозной промышленности со взвешенными частицами в пределах 15—120 мг/л и содержанием 15—30% органических веществ. Сточные воды угольной промышленности допускается сбрасывать в травяные бассейны при меньшей концентрации органических веществ. Степень очистки сточных вод в травяных бассейнах зависит от состава воды в них. Травяные бассейны, например, с двукосточником тростниковым и полевой белой метеолицей хорошо очищают поверхностные воды с фенолом (летучим) при его концентрации 0,1—0,2 мг/л (в 10^2 — $2 \cdot 10^2$ больше допустимых концентраций для хозяйственно-питьевых вод).

Травяные бассейны можно устраивать на грунтах и с невысокими коэффициентами фильтрации. Травяной покров укладывают из дерна на спланированное дно бассейна. В травяных бассейнах в период между заморозками слой воды должен составлять около $\frac{2}{3}$ длины стеблей растений; зимой же необходимо, чтобы слой воды покрывал траву целиком и нижняя кромка льда была выше травы. Травяные бассейны периодически опоражнивают, подсушивают в течение не менее двух недель и траву скашивают. При этом естественным путем происходит восстановление фильтрационных свойств травяного покрова, а при скашивании вместе с зеленой массой удаляются и накопленные в ней вещества. По опыту ГДР травяные бассейны без ремонта травяного покрова работают до 7 лет и более. В ФРГ в Рурском районе [20] на участке Хальтерн эксплуатируется семь инфильтрационных бассейнов общей площадью 7,84 га, занятых камышом (100 стеблей на 1 м²). Скорость

инфильтрации 1—1,5 м/сут без чистки сохраняется почти постоянной. На контрольных бассейнах без камыша производят очистку от ила раз в год. Ухаживают за камышом вручную, что пока обходится дорого, но способ этот перспективный, так как камыш хорошо очищает воду от ряда вредных веществ. В некоторых травяных бассейнах, как и в песчаных со значительным планктоном и бентосом разводят рыбу. Вероятно, при сильном развитии планктона некоторые виды рыб могут оказать пользу, поддерживая биологическое равновесие. Удобные площадки, заросшие соответствующими травами, можно использовать для инфильтрации при наличии, конечно, надлежащих водоносных горизонтов. Такие площадки по условиям рельефа целесообразно проектировать с ограждающими валиками необходимой высоты, определяемой глубиной затопления в теплый период и зимой. По данным В. С. Усенко, близ Цвиккау (ГДР) эксплуатируются для ИВПВ луга, которые хорошо работают много лет при постоянной инфильтрации. Использование лугов для ИВПВ особенно перспективно для ИВПВ в соответствующих гидрогеологических условиях при периодическом затоплении пойм рек с непостоянным расходом. Проектирование ИВПВ с травяными бассейнами производится как и для систем I типа, а на лугах — как по схемам для систем III типа.

Глава XII. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОДОЗАБОРОВ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Исходя из геологических и гидрогеологических условий, а также на основе технико-экономических показателей выбирается тип водозаборных сооружений и решается общая схема водозаборных сооружений при искусственном восполнении подземных вод. При строительстве таких сооружений требуется разрешение соответствующих геологических организаций. Эти сооружения размещают на участках вне населенных мест и промышленных предприятий, отвечающих санитарным требованиям, согласованным с местными органами санитарного надзора.

Техническое оборудование водозаборов с ИВПВ проектируют в соответствии со СНиП II-31-74. Эксплуатирующие и проектно-изыскательские организации руководствуются также «Положением о порядке использования и охране подземных вод на территории СССР», утвержденным Мини-

стерством геологии и охраны недр СССР и Главным государственным санитарным инспектором СССР 6 апреля 1960 г.

При размещении водозаборных сооружений следует учитывать особенности водоносных горизонтов и условия их питания. Участок должен находиться в благоприятных санитарных условиях, чтобы подземные воды не загрязнялись вредными компонентами и не подвергались размыву и другим деформациям, нарушающим сооружения. Необходимо также предусматривать организацию зоны санитарной охраны.

Подземные водозаборы в зависимости от расположения в водоносном пласте подразделяются на вертикальные, горизонтальные и лучевые. К вертикальным водозаборам относятся скважины и шахтные колодцы, к горизонтальным — дрены, галереи, штольни. Лучевые водозаборы относятся к комбинированным. Они состоят из водозаборного водонепроницаемого колодца, от которого расходятся горизонтальные лучи-дрены.

Важное значение имеет также схема расположения водозаборных сооружений на участке.

2. ВОДОЗАБОРЫ ИЗ СКВАЖИН

СХЕМА ВОДОЗАБОРОВ

Водозаборы из скважины в системах ИВПВ устраивают для получения подземных вод, залегающих на глубине более 10 м и приуроченных часто к толщам современных и древних отложений предгорных равнин, конусов выноса и речных долин. Водозаборы из скважин иногда применяются и в случаях залегания подземных вод на глубине менее 10 м от поверхности земли при мощности водоносного слоя свыше 5—6 м. Наиболее часто в системах ИВПВ устраивают скважинные водозаборы. Схему размещения водозаборных скважин целесообразно разрабатывать с более концентрированным их расположением, чтобы сократить протяженность коммуникаций: трубопроводов, линий электропередачи, связи и т. д. При этом наиболее оптимальные расстояния между водозаборными скважинами для песков принимают следующие: мелкозернистых — 50—100, среднезернистых — 70—150, крупнозернистых 100—200 м. В гравийных и трещиноватых породах эти расстояния увеличиваются до 120—250 м.

Для ориентировочных расчетов расстояние от инфильтрационных сооружений до водозаборных скважин устанавли-

вают в песках не менее 30 м для мелкозернистых, 50 м для среднезернистых и 100 м для крупнозернистых.

Число насосных резервных скважин для водозаборов принимается согласно СНиП II-31-74.

КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИН

В системах ИВПВ I типа обычно устраивают скважины глубиной не более 25—35 м.

На рис. 41 показана схема конструкций эксплуатационных скважин глубиной до 25—35 м для систем ИВПВ I типа при роторном и ударно-канатном бурении. Такие скважины состоят из следующих основных элементов: устья (верх скважины), забоя (низ скважины), кондуктора, обсадных труб и фильтровой колонны. Фильтровая колонна имеет надфильтровую часть, рабочую часть (фильтр), отстойник. В верхней части скважины предусматривается изоляция, чтобы обеспечить надежность работы скважин, предохранить обсадные трубы от химической и электрохи-

Рис. 41. Схема скважин глубиной 25—35 м

а — вращательного бурения с обратной промывкой; б — ударно-канатного бурения; 1 — обсадные трубы; 2 — фильтровая колонна (глухая часть); 3 — фильтр собственно; 4 — засыпка; 5 — отстойник; 6 — динамический уровень воды в скважине; 7 — статический уровень воды; 8 — изоляция (с кондуктором)

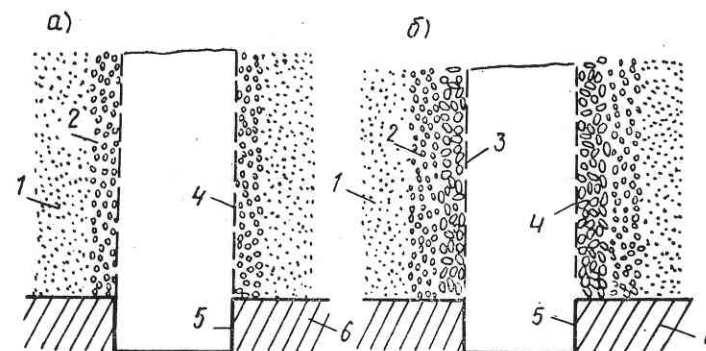
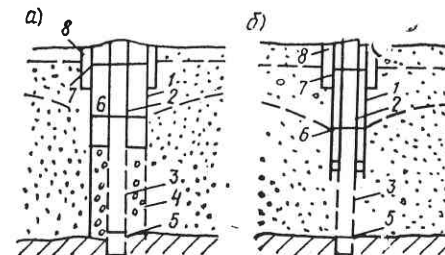


Рис. 42. Схема гравийного фильтра с засыпкой

а — однослойной; б — двухслойной (показана часть фильтра в водоносной породе и отстойник)
1 — песок (водоносная порода); 2 и 3 — слои засыпки; 4 — каркас фильтра; 5 — отстойная глухая часть фильтра; 6 — глина

мической коррозии, поддерживать стабильность дебита, качества воды, предохранить от загрязнения водоносный горизонт. Для этого применяют сальниковые, глинистые или цементные тампоны. Кроме того, выполняют межтрубную, затрубную цементацию и другие работы. При роторном способе бурения надежность цементации зазоров между трубами обеспечивается при разности диаметров смежных колонн не менее 50—100 мм, при ударном — 50 мм, а при обсыпке фильтра гравием — не менее 100 мм.

При сооружении скважины применяют трубы как стальные (лучше покрывать антикоррозионными лаками), так и асбестоцементные, керамические, пластмассовые. Эксплуатационным диаметром скважины считается внутренний диаметр трубы, где устанавливается насос. Этот диаметр принимается по номинальному диаметру насоса. Однако нужно проверять достаточность кольцевого зазора между электродвигателем и обсадной трубой с расчетом потерь напора.

Глубина скважины зависит от мощности водоносного горизонта, глубины перекрывающих пород, расчетных величин дебита, а также от возможного понижения уровня подземных вод (динамического уровня).

При устройстве скважин в рыхлых, неустойчивых скальных и полускальных породах устанавливают фильтры. Конструкцию и размеры фильтра в зависимости от гидрогеологических условий, требований эксплуатации принимают согласно СНиП II-31-74 (табл. 15). Фильтры скважин устраивают с каркасом двух основных типов: трубчатые и стержневые. Водоприемной фильтрующей поверхностью служат проволоочная обмотка, штампованный лист с отверстиями, металлические сетки, гравийная или песчано-гравийная обсыпка, поверхность из пористого бетона. В последнем случае каркас фильтра часто соединяют с пористым бетоном.

Гравийные фильтры в зависимости от литологического состава пород водоносного горизонта устраивают с однослойной или двухслойной обсыпкой (рис. 42). Двухслойную обсыпку чаще используют в мелкозернистых песках. Материалы для гравийных обсыпок подбирают при соотношении $D_{50} : d_{50} = 8—12$.

Размеры проходных отверстий фильтров принимают в зависимости от крупности частиц водоносной породы d_{50} и коэффициента неоднородности породы k_n (табл. 16).

При напорных водоносных горизонтах мощностью до 10 м длина рабочей части фильтра, согласно СНиП II-31-74, принимается равной мощности пласта. При установке

Таблица 15. Выбор типа конструкции фильтра в зависимости от пород водоносного горизонта

Породы	Фильтры
Полускальные неустойчивые породы, щебенистые и галечниковые с преобладающей крупностью частиц щебня и частиц 20—100 мм (>50% по массе)	Трубчатые фильтры с круглой и щелевой перфорацией. Стержневые фильтры.
Гравий, гравелистый песок с крупностью частиц 1—10 мм и с преобладающей крупностью частиц 2—5 мм (>50% по массе)	Трубчатые фильтры с круглой и щелевой перфорацией, с водоприемной поверхностью из проволоочной обмотки или из штампованного стального листа Стержневые фильтры с обмоткой проволокой из нержавеющей стали или с водоприемной поверхностью из штампованного листа
Пески крупнозернистые с преобладающим размером частиц 1—2 мм (>50% по массе)	Трубчатые фильтры с щелевой перфорацией, с водоприемной поверхностью из проволоочной обмотки, штампованного стального листа или из сетки квадратного плетения Стержневые фильтры с водоприемной поверхностью из проволоочной обмотки, стального штампованного листа или из сетки квадратного плетения
Пески среднезернистые с преобладающей крупностью частиц 0,25—0,5 мм (более 50% по массе)	Трубчатые и стержневые фильтры: с водоприемной поверхностью из сеток гладкого (галунного) плетения; с однослойной гравийной обсыпкой (гравийные фильтры)
Пески мелкозернистые с преобладающей крупностью частиц 0,1—0,25 мм (более 50% по массе)	Трубчатые и стержневые фильтры с одно-, двух- или трехслойной песчаной или песчано-гравийной обсыпкой (гравийные фильтры). Блочные фильтры.

в безнапорных горизонтах длина рабочей части фильтра устанавливается равной мощности пласта за вычетом эксплуатационного понижения уровня в скважине с тем, чтобы фильтр был затоплен. При установке же фильтров в водоносных горизонтах мощностью более 10 м длина

Таблица 16. Размеры проходных отверстий фильтров, мм, водозаборных скважин

Тип фильтра	При коэффициенте неоднородности пород	
	$k_H < 2$	$k_H > 2$
С круглой перфорацией	(2,5—3) d_{50}	(3—4) d_{50}
С щелевой перфорацией	(1,25—1,5) d_{50}	(1,5—2) d_{50}
Сетки	(1,5—2) d_{50}	(2—2,5) d_{50}

рабочей части фильтра определяется с учетом водопроницаемости пород, конструкции фильтра и подачи скважины. Следует иметь в виду, что ее целесообразно размещать от кровли и подошвы водоносного пласта на расстоянии не менее 0,5—1 м.

Фильтры скважин должны быть устойчивы против механических повреждений, обеспечивать минимальное гидравлическое сопротивление, не подвергаться химическим воздействиям агрессивных подземных вод. В последнем случае металлические фильтры следует покрывать антикоррозионными лаками или изготавливать их из пластмассы, бетона и др. Для накопления взвешенных частиц, поступающих вместе с водой из водоносного горизонта, нижняя часть фильтра имеет отстойник, изготовленный из глухой трубы такого же диаметра, как и у фильтра, длиной около 2 м.

Различные способы бурения определяются гидрогеологическими и техническими условиями, в частности глубиной скважины и ее расходом, уровнем воды в ней и качеством, диаметром фильтра, требованиями к ремонту, расположением в скважине водоподъемника.

Для систем ИВПВ II типа, а иногда и III типа при больших глубинах водозаборных (а также инфильтрационных) скважин кроме указанных выше способов бурения роторного и ударного-канатного, применяемых в системах ИВПВ I типа, используют и другие, в частности комбинированный — роторно-вращательный с прямой промывкой в комбинации с ударным способом, а для проходки крепких и очень крепких пород — и колонковый способ.

В табл. 17 даны рекомендации по выбору способов бурения. При ударно-канатном способе бурения по мере раздробления и извлечения пород станки скважин крепят трубами непрерывно по мере углубления забоя; при устойчивых породах стенки скважин крепят исходя из условий ее эксплуатации.

Роторное бурение применяют двух видов: с прямой и обратной промывкой. При бурении с прямой промывкой с

Таблица 17. Общая характеристика условий применения различных способов бурения скважин на воду

Способ бурения	Глубина, м	Начальный диаметр бурения, мм	Породы	Кольматация фильтрационной зоны при бурении
Ударно-канатный	150	500 и более	Рыхлые и скальные	Легко предупреждается
Роторный: с прямой промывкой	Практически не лимитируется	До 500	То же	Происходит кольматация, за исключением проходки фильтрующей зоны с промывкой чистой водой
с обратной промывкой*	300	До 1000 и более	В породах I—IV категории	Легко предупреждается
с прямой промывкой в комбинации с ударно-канатным	Практически не лимитируется	До 500	Рыхлые и скальные	В водоносной зоне предупреждает кольматацию
Колонковый	То же	До 200	В породах высокой прочности	В водоносной зоне надо переходить на промывку чистой водой

* Обеспечивает получение увеличенных дебитов.

помощью насоса промывочная жидкость в виде глинистого раствора подается по бурильным трубам в проходимую при бурении скважину, откуда она вместе с разбуренной породой поднимается и сбрасывается в отстойник. При бурении с обратной промывкой в качестве промывочной жидкости используется чистая вода, которая из специальной емкости подается самотеком в бурящуюся скважину к забою. Отсюда промывочная жидкость вместе с частицами породы может отсасываться насосом, установленным у устья скважины, и подаваться в специальную емкость.

По мнению В. М. Гаврилко, Н. Д. Бессонова, В. С. Алексеева, роторное бурение с обратной промывкой имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами: большая скорость бурения, меньший расход обсадных труб по сравнению с ударно-канатным способом, возможность проходки скважин больших диаметров с обсыпкой фильтров песчано-гравийным материалом слоями большей толщины при значительных интервалах без обсадки. При этом за счет избыточного давления, создаваемого столбом воды, стенки скважины удерживаются от обрушения.

ОБОРУДОВАНИЕ СКВАЖИН

На рис. 43 показана наиболее часто применяемая схема оборудования скважины. В скважинах систем ИВПВ устанавливают погружный электродвигатель и насос. К агрегату подводят кабель. Конструкция оголовка скважины в виде опорной плиты должна обеспечивать полную герметизацию, исключая проникновение в межтрубное пространство загрязнений. В опорной плите предусматривают отверстия для подвода кабеля и пропуска стальной трубки для наблюдений за уровнем воды в скважине (для уровня). Вода из скважины в насос поступает через сетку. Некоторые детали на рис. 43 не показаны, например обвод с вентилями для отбора воды. Конечно, могут быть и другие схемы оборудования скважин. Устье скважины может располагаться как в заглубленной камере, так и в наземном павильоне. Высота павильона должна быть не менее 2,5 м.

На подающем напорном трубопроводе предусматривают кран для отбора проб воды, манометр для замера давления, задвижки, обратный клапан, а также ответвление для отвода воды при прокачке. Водомер следует устанавливать как непосредственно в скважине, так и в отдельном колодце. Кроме того, в павильонах устанавливают приборы отопления, контрольно-измерительную аппаратуру, приборы ав-

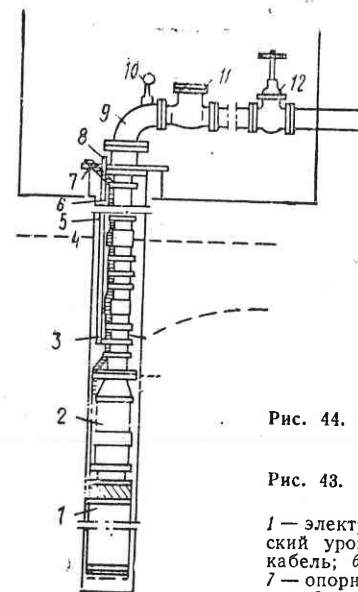
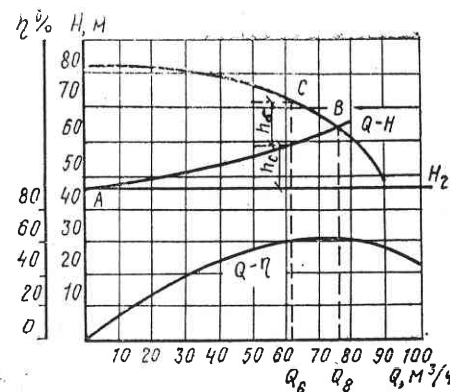


Рис. 44. Характеристика работы погружного центробежного насоса

Рис. 43. Схема оборудования скважины с погружным центробежным электронасосом

1 — электромотор; 2 — центробежный насос; 3 — динамический уровень воды; 4 — статический уровень воды; 5 — кабель; 6 — наблюдательная трубка (за уровнем воды); 7 — опорная плита; 8 — колпачок на наблюдательной рубке; 9 — колено; 10 — манометр; 11 — обратный клапан; 12 — задвижка



томатики. Размеры здания павильонов в плане принимают из условия размещения необходимого оборудования с обеспечением нормальных проходов.

При устройстве заглубленных зданий павильонов и камер особое внимание следует обращать на предотвращение попадания в них ливневых или грунтовых вод. Поэтому необходимо предусматривать соответствующую гидроизоляцию. При расположении скважин на затопляемой местности павильоны обычно делают наземные с обсыпкой их грунтом на высоту, превышающую максимальный паводковый горизонт. Обсыпку павильона крепят каменным мощением или посевом трав.

В системах ИВПВ часто целесообразно в скважинах устанавливать погружные насосы. Насосы для скважин подбирают по расходу воды, получаемой скважиной Q_c , и напору H_p , определяемому по формулам (84 и 107).

$$H_p = H_r + \Sigma h, \quad (107)$$

где H_r — геометрическая высота подъема, измеряемая от динамического уровня воды в скважине до максимального уровня воды в резервуаре, куда она подается; Σh — сумма потерь напора на пути движения воды от уровня воды в скважине до резервуара.

Геометрическая (полная) высота подъема H_r определяется, как сумма геометрической высоты подъема от статического уровня в скважине H_r до максимального уров-

ня воды в резервуаре и расчетного понижения уровня воды в скважине S_p при расходе из нее Q_c . Строго следует учитывать колебания статического уровня воды в скважине и в резервуаре. При определении суммы потерь напора Σh учитываются гидравлические сопротивления в щели между электродвигателем и обсадной трубой, в эксплуатационной колонне и в трубопроводах от данной скважины до резервуара.

По каталогу насосов выбирают тип насоса. На рис. 44 показана характеристика работы погружного центробежного электронасоса. На график наносится требуемый полный геометрический напор и проводится прямая параллельно оси Q и к ней дополнительно проводится параболическая кривая $A-B$, построенная на основании определения потерь напора в трубопроводах h_c . Пересечение кривых $Q-H$ и $A-B$ (точка B) дает точку с наилучшим КПД. При регулировании задвижкой и дополнительных сопротивлениях h_z (от задвижки) фактический расход Q_c определяется точкой C .

В настоящее время промышленностью выпускаются артезианские насосы в основном двух типов: глубинного типа A и погружные ЭЦВ. В табл. 18 приведена краткая характеристика некоторых типоразмеров, применяемых из наиболее распространенных погружных насосов ЭЦВ.

Методика гидравлического расчета водозаборов со скважинами, оборудованными погружными электронасосами в системах ИВПВ по схеме «скважины — водоподъемники — водоводы» изложена в главе IX. В результате проведения расчетов должно быть определено число водозаборных скважин, их размеры (глубины, диаметры), расстояние между сооружениями, дебит водозабора, уровни воды. При проведении расчетов учитывается принятая схема расположения скважин и инфильтрационных бассейнов.

СИФОННЫЕ И ВСАСЫВАЮЩИЕ ВОДОЗАБОРЫ

В случае, когда динамический уровень подземных вод в скважинах ИВПВ располагается на глубине не более 7—8 м от поверхности земли, чаще всего при небольшой мощности водоносного горизонта, целесообразно осуществлять подачу воды из скважин сифонным способом. На рис. 45 показана принципиальная схема устройства такого водозабора. Для этого на насосной станции устанавливают вакуум-насосы для ввода сифона в работу и поддержания вакуума. Вода собирается сифонным трубопроводом из отдельных скважин в сборный колодец, откуда забирается

Таблица 18. Краткая техническая характеристика погружных центробежных электронасосов ЭЦВ

Марка или тип насоса	Подача, $m^3/ч$	Напор, м	Мощность электродвигателя, кВт	Число оборотов, мин	КПД центробежного насоса, %	Наружный диаметр (наибольший) электронасоса, мм	КПД электродвигателя	Требуемый подпор для насоса, м	Внутренний минимальный диаметр обсадной трубы, мм
ЭЦВ-8-25-100	25	100	11	2850	66	186	83	1	200
ЭЦВ-8-25-150	25	150	16	2850	66	186	84	1	200
ЭЦВ-8-25-300	25	300	32	2900	68	186	87	1	200
ЭЦВ-8-40-65	40	65	11	2850	68,5	186	83	1	200
ЭЦВ-8-40-165	40	165	32	2900	68,5	186	86	1	200
ЭЦВ-10-63-110	63	110	32	2920	70	235	86,5	1	250
ЭЦВ-10-63-270	63	270	65	2920	71	235	88	1	250
ЭЦВ-10-120-60	120	60	32	2920	86,5	235	86,5	1	250
ЭЦВ-10-160-35	160	35	32	2925	70	235	85	1	250
ЭЦВ-10-160-65	160	65	45	2920	72	281	87	1	301
ЭЦВ-12-160-100	160	100	65	2925	72	281	88	1	301
ЭЦВ-12-210-25	210	25	22	2925	74	281	85	2	301
ЭЦВ-12-210-85	210	85	65	2990	75	281	74	2	301
ЭЦВ-12-255-35	255	35	32	2920	73	281	86,5	2	301
ЭЦВ-12-375-30	375	30	45	2920	76	281	87	6	301

насосами для подачи потребителю. При движении воды из скважины 1 до скважины 2 происходит потеря напора h_{1-2} и далее соответственно до сборного колодца Σh . Для запуска сифона из него должен быть удален воздух. Воздушные трубки могут присоединяться к сифонному трубопроводу около сборного колодца. В связи с этим сифон должен иметь уклон от сборного колодца к скважинам в пределах 0,005—0,0002 в зависимости от длины сифона. При большой длине сифона воздушные трубки присоединяются к высоким точкам. Уклон при этом может быть несколько меньшим.

Величина вакуума в наивысшей точке водовода составляет:

$$h_{\text{вак}} = H_1 + (v^2/2g) + \Sigma h, \quad (108)$$

где H_1 — расстояние по высоте между уровнем воды в скважине и наивысшей точкой водовода, м; v — скорость, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; Σh — сумма потерь напора, м.

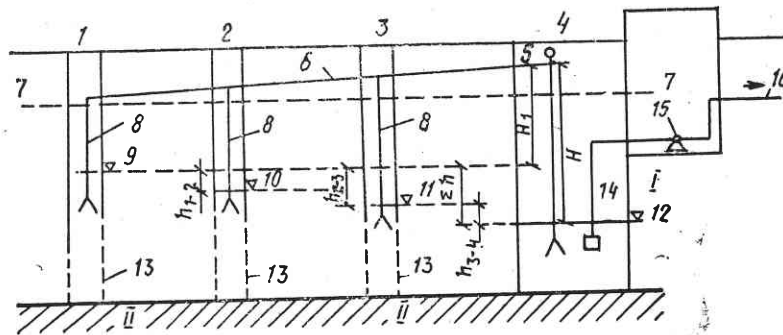


Рис. 45. Схема сифонного водозабора из скважин

1 — водоносный горизонт; 11 — глины; 1—3 — скважины; 4 — сборный колодец; 5 — к вакуум-насосу; 6 — трубопровод; 7 — статический уровень воды; 8 — ответвления труб сифона в скважинах; 9—11 — динамические уровни воды в скважинах 1—3; 12 — уровень воды в сборном колодце; 13 — фильтры; 14 — всасывающая труба; 15 — всасывающий насос; 16 — напорный трубопровод; h_{1-2} — потери напора при движении воды в сифоне соответственно от скважины 1 до скважины 2 и т. д.

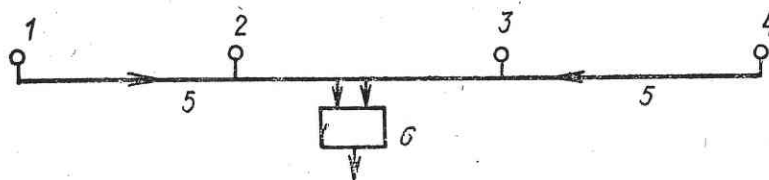


Рис. 46. Всасывающий водозабор из скважин

1—4 — скважины; 5 — всасывающие трубы; 6 — насосная станция

При работе сифонного водовода должно соблюдаться условие

$$h_{\text{вак-макс}} \leq h_{\text{вак-доп}}, \quad (109)$$

где $h_{\text{вак-доп}}$ — допустимый вакуум, обычно не превышающий 0,06—0,08 МПа.

По эмпирическим данным на каждые 1000 м³/сут расхода воды сифона и на 1000 м его длины принимается до 1 л/с расход выделяемого воздуха, который нужно отсасывать вакуум-насосом. При гидравлическом расчете сифонных водоводов определяются диаметры труб по формулам движения воды, общие потери напора и максимальная величина вакуума по длине сифонной линии. Скорость движения воды в сифонном водоводе можно принимать в пределах 0,3—0,7 м/с. Сборные водоводы для тщательной герметизации целесообразно устраивать из стальных труб. Следует отметить, что сифонные водоводы можно укладывать и с уклоном по движению воды. При этом необходимо выпускать из него воздух. Устанавливают также в точках отсоса воздуха вакуум-насосами воздушные колпаки или вакуум-котел, объем которого принимается на 3—5 мин работы вакуум-насоса.

В том случае, если вакуум-котел устанавливают около всасывающего насоса, то отпадает надобность в сборном колодце и вода из вакуум-котла поступает прямо во всасывающий насос. В последнем случае получается комбинация из всасывающего и сифонного водозаборов.

Всасывающий водозабор устраивают по схеме, приведенной на рис. 46. При этом всасывающие трубы прокладывают с подъемом к насосной станции. Перед всасывающим насосом ставится вакуум-котел, из которого воздух отсасывается вакуум-насосом. В результате с вакуумом выделяется воздух и во всасывающих насосах может усиливаться кавитация. Это улучшает высоту всасывания насосов, а эксплуатация вакуум-насоса дешевая, так как расход энергии очень небольшой в пределах одного—нескольких киловатт. Излив воды в сборный колодец осуществляется под уровень воды в нем. Для быстрой зарядки сифона на концевой трубе его в колодце устанавливают задвижку. При изливе под уровень конец трубы в колодце должен быть опущен на глубину не менее 0,5 м самого низкого уровня воды.

При большой длине водозабора устраивают несколько сифонных водоводов со сбросом воды в сборный колодец. При устройстве сифонных водоводов павильоны над скважинами, как правило, не устраивают. Оголовки скважин

обычно заключают в колодцы, верх которых выводится выше уровня паводковых вод. Стенки колодцев покрывают гидроизоляцией, чтобы предотвратить попадание паводковых вод. Люк колодца также тщательно герметизируют.

Примером устройства сифонных сборных водоводов в системе ИВПВ может служить водозабор в районе Прибалтики, работающий по указанной схеме продолжительное время.

3. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ВОДОЗАБОРЫ

СХЕМА

В практике ИВПВ горизонтальные водозаборы устраивают на установках, где при водоносных горизонтах мощностью 6—8 м применяют открытые инфильтрационные сооружения. Принципиальная схема ИВПВ с таким водозабором представлена на рис. 47. Горизонтальные водозаборы устраивают при небольшой вместимости водоносного слоя глубиной до 6—8 м. Водосборные трубы, реже галереи располагают на водоупоре перпендикулярно потоку движения грунтовых вод.

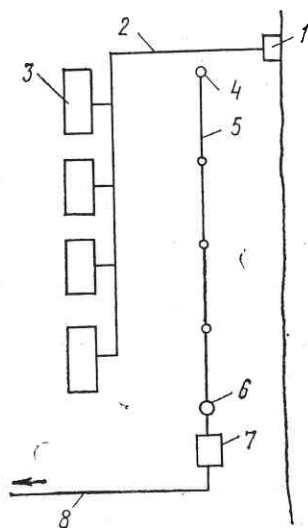


Рис. 47. Горизонтальный водозабор в системе ИВПВ

1 — водозабор из поверхностных вод; 2 — труба, подающая воду в инфильтрационные бассейны; 3 — инфильтрационный бассейн; 4 — смотровой колодец; 5 — собственно горизонтальный водозабор; 6 — сборная камера-резервуар; 7 — насосная станция; 8 — напорный водовод от насосной станции

Горизонтальные водозаборы применяют нескольких типов: в виде открытых канав, каменно-щебеночной дрены, трубчатой дрены или галереи. Первые два типа для хозяйственно-питьевого водоснабжения в настоящее время не применяют. В системах ИВПВ целесообразнее всего использовать водосборные устройства в виде трубчатой дрены.

Преимущество эксплуатации горизонтальных водозаборов по сравнению с вертикальными — это возможность перехвата почти всего подземного потока, при этом вода отводится в сборный колодец самотеком. В то же время недостатком является меньшая защищенность от внешних загрязнений. Как указывает А. Ф. Порядин, горизонтальные водозахватные устройства на береговых водозаборах чаще всего

оказываются в зоне затопления паводковыми водами. Поэтому площадку водозаборов ограждают дамбами, водозахватные устройства сверху перекрывают глиняными экранами. Возможность расширить такие водозаборы, удлинив ряд водозаборных устройств, ограничена, ввиду того, что по мере удаления от сборного колодца из-за уклонов трубчатых дрен нельзя перехватить весь водоносный поток. Несмотря на это эксплуатационные затраты ниже, чем при устройстве вертикальных водозаборов. Расстояние от водозаборных устройств до инфильтрационных бассейнов принимают аналогично тому, как это делают при вертикальных скважинах.

КОНСТРУКЦИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

Водоприемную часть горизонтальных водозаборов для ИВПВ, как указывалось выше, целесообразно выполнять в виде трубчатых дрен. При этом принимают керамические, асбестоцементные, железобетонные и пластмассовые трубы с круглыми или щелевыми отверстиями с боков и в верхней части трубы. Нижняя часть трубы (не более $\frac{1}{3}$ по высоте) без отверстий и служит в качестве лотка для стока воды. Чтобы предотвратить вынос частиц породы из водоносного горизонта, вокруг водоприемной части горизонтальных водозаборов предусматривают обратный фильтр из двух-трех слоев каждый толщиной 10—15 см. Размеры же частиц засыпки отдельных слоев обратного фильтра принимают такими же, как и для фильтров скважин.

Уклоны труб в сторону водосборного колодца выполняют согласно СНиП II-31-74 (не менее):

Диаметр труб, мм	150	200	250	300	400	500
Уклон	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001

По длине горизонтального водозабора на расстоянии не более 50 м при диаметре до 600 мм, 75 м и более при диаметре свыше 600 мм для наблюдения, вентиляции и ремонта устраивают смотровые колодцы. Колодцы диаметром 1 м устанавливают также при изменении уклона и направления трассы водоприемных дрен. Для избежания попадания загрязнений люк колодца должен быть выше отметки земли на 0,5 м. Вокруг колодца предусматривают глиняный замок. Колодцы оборудуются вентиляционными трубами. В днище колодцев устраивают бетонные лотки с подводом и отводом от них труб.

Подвод воды от трубчатых дрен осуществляется в сборный колодец, представляющий собой резервуар, сооружаемый из сборного железобетона. Колодец служит регулировочной емкостью, а также в нем осаждаются взвешенные частицы и размещаются всасывающие трубы. Днище сборной камеры обычно расположено ниже подводящей дрены на 1—1,5 м. Насосные станции для отбора воды из сборных колодцев могут быть как совмещенными с ними, так и раздельными.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Параметры трубчатых дрен рассчитывают по тем же формулам, что и для самотечных трубопроводов. Расчетное наполнение принимается 0,5 диаметра трубы. Скорость движения воды, необходимая для перемещения взвешенных частиц из трубчатых дрен в сборный колодец, устанавливается не менее 0,7 м/с.

При расчете горизонтальный водозабор разбивают на участки с расходом воды в конце каждого Q_i . При этом диаметр трубчатой дрены d_d с запасом определяется по формуле

$$d_d = \sqrt{8Q_i / \pi v_n}, \quad (110)$$

где v_n — незаиливающая скорость движения воды, м/с.

Пропускная способность самотечных трубчатых дрен проверяется также по уклону согласно известным формулам. Площадь же водоприемных отверстий f_o , м², на 1 м длины горизонтального водозабора можно рассчитывать по выражению

$$f_o = Q_i / 86400 \mu \sqrt{2gh_1}, \quad (111)$$

где $Q_i = Q/L$ — удельный приток на 1 м, м³/(сут·м); μ — коэффициент расхода, равный 0,6—0,62; g — ускорение свободного падения, м/с²; h_1 — средний напор над водоприемными отверстиями, м.

Число отверстий и расстояние между ними определяются по заданному диаметру одного отверстия. Диаметр отверстий или нижних щелей проверяют по засыпке.

Расход горизонтальных водозаборов в системе ИВПВ следует рассчитывать с учетом не только источников питания до искусственного восполнения, но и с учетом инфильтрационных бассейнов и каналов. Основы расчета изложены в главе VII. Примеры подробных расчетов приведены в работах Ф. М. Бочверера, Н. Н. Лапшина [13, 28 и др.], Н. А. Плотникова и К. И. Сычева [20], Н. И. Плотникова, Н. А. Плотникова и К. И. Сычева [21] и других работах [13, 17, 28 и др.].

4. ЛУЧЕВЫЕ ВОДОЗАБОРЫ

Лучевые водозаборы являются разновидностью горизонтальных водозаборов, которые в виде фильтровых труб-лучей расходятся из шахтного колодца.

На рис. 48 в плане и разрезе показаны возможные схемы лучевых водозаборов в системе ИВПВ. На этих схемах фильтровые трубы расположены ближе к подошве водоносного горизонта в виде лучей вдоль берега параллельно инфильтрационным бассейнам и в виде расходящихся лучей под руслом реки. Мощность водоносного слоя под рекой принимают не меньше 3—5 м, проверяя достаточность очистки поверхностной воды через это русло реки. Фильтровые трубы вдавливаются из шахтного колодца в водоносные песчано-гравийно-галечниковые отложения, а породу извлекают по мере вдавливания.

Такие лучевые водозаборы применяют при мощностях водоносного горизонта больше 6—8 м, когда по технико-экономическим причинам ограничивается заложение горизонтальных труб в вырытых канавах, и примерно до мощности в 20 м, так как при меньшей мощности расход водозаборов, состоящих из скважин, становится менее выгодным. Длина отдельных лучей принимается до 20—60 м (редко больше), исходя из местных условий. Иногда продавливание труб-лучей выполняют так: для проходки

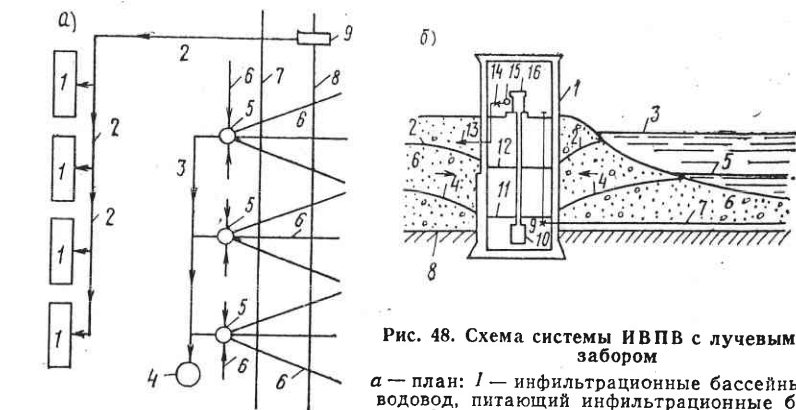


Рис. 48. Схема системы ИВПВ с лучевым водозабором

а — план: 1 — инфильтрационные бассейны; 2 — водовод, питающий инфильтрационные бассейны; 3 — сборный водовод шахтных колодцев лучевого водозабора; 4 — сборный резервуар; 5 — шахтные колодцы; 6 — горизонтальные дрены — лучи; 7 — берег реки во время паводка; 8 — то же, в межень; 9 — береговой водозабор; 10 — разрез: 1 — шахтный колодец; 2 — эксплуатационный уровень грунтовых вод при паводке; 3 — уровень в реке при паводке; 4 — эксплуатационный уровень грунтовых вод в межень; 5 — уровень в реке в межень; 6 — водоносный горизонт; 7 — горизонтальная дрена — луч; 8 — подошва водоносного горизонта — глины; 9 — задвижка на дрена — луче; 10 — вертикальный центробежный насос; 11 — динамический уровень воды в шахтном колодце в межень; 12 — то же, в паводок; 13 — напорный водовод; 14 — задвижка; 15 — обратный клапан; 16 — вертикальный электродвигатель

Одного луча используют две трубы; сначала проходку ведут трубой большего диаметра и затем меньшего диаметра; разница диаметров устанавливается около 50 мм. В некоторых случаях проходят сначала луч прочной стальной трубой; затем в нее вставляют фильтр-луч меньшего диаметра, а первую трубу извлекают. Это, в частности, выгодно, когда водоносные пески имеют крупность зерен < 1 мм (без гравия и гальки). Угол между лучами принимают не менее 30° . Стальные трубы подбирают по расчету диаметром около 75—250 мм.

Диаметр шахтного колодца, обычно железобетонного опускного, принимают около 2—5 м в зависимости от способа продавливания труб-лучей. Каждая труба-луч, входящая в шахтный колодец, снабжается задвижкой. Водоподъемник обычно располагают в шахтном колодце в виде вертикального или при соответствующих условиях горизонтального центробежного электронасоса. Расстояние между шахтными колодцами лучевых водозаборов при указанных выше схемах определяют возможной проходкой луча-фильтра (равно двойной его длине).

Лучевые водозаборы применяют в песчано-гравийно-галечниковых отложениях без валунов. В таких породах важна примесь гравия и гальки, чтобы при эксплуатации не было пескования. Отверстия фильтра можно рассчитывать по таблице проходных отверстий (см. табл. 16). Расчет лучевого водозабора в системе ИВПВ ведется по обычному методу суперпозиций-влияний реки по вышеизложенной схеме и инфильтрационных бассейнов. Теоретический расчет только одного лучевого водозабора в отмеченной схеме сложен и к тому же нужно учитывать влияние инфильтрационных бассейнов. Расчеты с дополнительным учетом инфильтрационных бассейнов можно использовать из работ Г. А. Разумова и других авторов. Рассчитывать лучевой водозабор лучше методами физического моделирования: с помощью метода ЭГДА (в частности, на электропроводной бумаге), в жидкости, а также воспроизведением сеточных моделей. Можно воспользоваться электроинтегратором В. С. Лукьянова.

Глава XIII. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ИВПВ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

1. РАЙОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

В области многолетней мерзлоты обычно выделяют надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные подземные воды. Для искусственного восполнения подземных вод в

таких условиях особенно существенное значение имеют суровые климатические условия с продолжительной и весьма холодной зимой, а также возможность промерзания водоносных горизонтов и полное промерзание зимой многих рек.

Одним из возможных вариантов получения подземных вод при искусственном их восполнении может быть оттаивание мерзлых пород, вместимость которых иногда используется для искусственного восполнения подземных вод. Несмотря на неблагоприятные условия искусственного восполнения подземных вод в области многолетней мерзлоты, такой метод является перспективным и уже применяется на северо-востоке Азии СССР (Л. Т. Мотрич, 1966—1973 гг.). Это объясняется тем, что для ряда объектов, где требуется хозяйственно-питьевая вода, зимой ее не хватает или совсем нет и приходится транспортировать издалека. Для некоторых объектов в условиях многолетней мерзлоты себестоимость 1 м^3 поверхностной и подземной воды достигает 1 руб. и более.

Искусственное восполнение возможно в надмерзлотных, межмерзлотных и подмерзлотных подземных водах, а также, как мы упоминали, в мерзлых породах при их оттаивании. В большинстве случаев инфильтрация целесообразна через поглощающие скважины; в отдельных случаях для восполнения надмерзлотных вод можно применять инфильтрационные бассейны, но только в летний период. Это определяется суровой зимой, которая длится на севере около 8 мес. Для водопроводящих таликов (надмерзлотных вод), по материалам Л. Т. Мотрича, рассматриваются следующие способы искусственного восполнения.

Перекачка воды из того же горизонта в начале осени из нижнего (по течению) участка подземного потока в верхний участок — выше водозабора. Такой способ применяли при водоносных горизонтах, имеющих коэффициент фильтрации 200—250 м/сут, мощность 8—10 м, гидравлический уклон 0,001—0,009 и дебит водозабора 5—10 л/с. Гидрогеологический расчет в этом случае с учетом граничных условий (пласт — полоса) при постоянной откачке из эксплуатационного водозабора, а также при периодической откачке и закачке для восполнения ведут обычным гидродинамическим методом для неустановившегося движения воды. При таких условиях в долине р. Боханчи, правого притока р. Колымы, перекачка воды увеличивала прежний дебит водозабора в зимне-весенний период в 1,5 раза.

Регулирование запасов подмерзлотных вод с помощью барража целесообразно применять при значительном про-

дольном уклоне долины (0,001—0,05 и более) и мощности отложений 8—10 м. Такие условия имеются во многих долинах рек бассейна р. Колымы.

Подпитывание инфильтрационными скважинами. Межмерзлотные и подмерзлотные воды в летний период рекомендуется подпитывать более теплой очищенной водой, что создает благоприятные тепловые условия. Гидрогеологический расчет в этом случае можно вести известными методами.

Искусственное создание таликов путем гидравлического и электрического оттаивания. Способ используется при наличии мерзлых пород. Этот способ примерно в 10 раз дороже гидравлического оттаивания.

Искусственное восполнение в сквозных таликах путем откачки в летний период. В этом случае при одновременной интенсивной инфильтрации более теплых вод создается большая емкость талика при оттаивании, и подземные воды к осени имеют более высокую температуру.

Искусственное восполнение подземных вод даже в суровых условиях Крайнего Севера по экономическим признакам конкурентноспособно по сравнению с другими источниками водоснабжения (см. главу XVI).

Проектирование систем ИВПВ в районах многолетней мерзлоты следует выполнять с учетом требований СНиП II-31-74 ч. II, гл. 31, пп. 14.95—14.138. В частности, при проектировании ИВПВ необходимо учитывать изменение температурных условий в грунтах оснований сооружений при строительстве и эксплуатации и предусматривать необходимые мероприятия против замерзания воды зимой в системах ИВПВ.

2. АРИДНЫЕ РАЙОНЫ

Для аридных областей в связи с высоким испарением воды характерно широкое распространение грунтовых соленых вод. Здесь встречаются пресные подземные воды, которые в ряде мест в зависимости от условий залегания имеют некоторые особенности, а именно: линзы пресных вод, плавающие на соленых, подземные пресные воды в такырах среди соленых вод (и на них) и др. Кроме того, распространены слабосоленые воды, пригодные для водопоя скота и при недостатке пресных вод в ряде районов после опреснения для питьевых целей.

В Средней Азии и раньше собирали в такыры поверхностные пресные воды, которые фильтровались через слабопроницаемые суглинки; так накапливались пресные или

слабосоленые воды. Затем стали осуществлять фильтрацию поверхностной воды через колодцы. В настоящее время проводятся работы по ИВПВ на пониженных участках с оттаиванием и затем с инфильтрацией в бассейнах; при этом вскрываются покровные очень слабопроницаемые илисто-глинистые отложения.

ИВПВ в такырах применялось много сотен, а может быть и тысяч лет тому назад, когда в пустынях Кара-Кума и других кочевники пасли свои стада. С тех пор сохранились поглощающие колодцы, через которые поступает сток ливневых дождей в водоносные пески. Особенностью такого ИВПВ являлось вытеснение пресными поверхностными водами соленых грунтовых вод часто с минерализацией до 30 г/л и более. В результате образовывалась линза пресных вод, плавающая на соленых грунтовых водах. Такие линзы пресных вод необходимо эксплуатировать с необходимыми предосторожностями, а именно: откачивать пресные воды с небольшим понижением или одновременно откачивать и соленые грунтовые воды, чтобы предотвращать приток этих соленых вод к эксплуатационным скважинам, предназначенным для получения пресных вод. Гидродинамические расчеты водозаборов для получения пресной воды в описанных условиях изложены в работах И. С. Глазунова и Н. Г. Шевченко (1958, 1960 гг. и др.).

Раньше в некоторых пустынях на такырных системах ИВПВ основывалось даже водоснабжение аулов; в настоящее время ряд аулов в пустынях использует такие системы. Необходимость соблюдения экологических условий, обеспечивающих возможность эксплуатации ИВПВ в такырах можно проиллюстрировать следующим примером. На одном крупном такыре в XX в. была реконструирована система ИВПВ. Покрывающую такыр глину стали разрабатывать для строительных целей, поверхность такыра изрыли карьерами. Затем устроили взлетно-посадочную площадку для самолетов, а водосборную сеть уничтожили. В связи с этим питание подтакырных грунтовых вод пресными дождевыми водами прекратилось и при несоблюдении отмеченных выше экологических требований при откачке грунтовых вод наступило быстрое их засоление. В результате этого пришлось ликвидировать крупный поселок (по данным В. Н. Кунина, 1959 г.) По тем же данным в пос. Зеагли в пустыне Кара-Кара водоснабжение основано на ИВПВ в такыре и пресная вода получается в общем хорошего качества. Можно привести ряд других примеров, когда ИВПВ из такыров работает хорошо.

Пресные подземные воды встречаются в пустынях под барханами, которые в известной степени являются поисковым показателем. Однако не под всеми барханами накапливаются пресные воды. При благоприятных условиях запасы пресных вод можно увеличить искусственным распределением вод поверхностного стока и их последующей инфильтрацией. При этом одно из важнейших условий — предохранить пресные воды от засоления, в особенности при эксплуатации.

В ряде районов земного шара продолжают использовать цистерны как полые, так и заполненные песком для получения запасов подземных вод. При длительном хранении вода в полых цистернах портится, а в заполненных песком не портится, как в водоносном горизонте. К западу от дельты р. Нила ранее стояли цистерны, построенные еще во время Римской империи, общей вместимостью около 4000 м³. И только в начале XX в. их восстановили для водоснабжения (Али Шафи, 1952). Для централизованного водоснабжения г. Адена, где среднегодовое количество осадков составляет около 30 мм в год, дождевую воду собирают в цистерны общей вместимостью 50 тыс. м³ (Вильсон, 1903 г.).

Источником получения пресных подземных вод в предгорных районах, а местами и в равнинах пустынь служат логи, сток по которым чрезвычайно неравномерен. Большую часть года, а то и в течение ряда лет эти логи бывают сухие, а во время очень редких сильных дождей расходы достигают сотен м³/с (западные склоны Копет-Дага); при этом вода бывает очень мутной и превращается иногда в грязевой поток. В таких условиях необходимо многолетнее регулирование запасов подземных вод и предварительное их отстаивание для дальнейшей поверхностной инфильтрации. Важно выбрать участок для накопления запасов подземных вод по емкости, фильтрационным свойствам и наличию соленых вод. При благоприятных условиях сток логов при искусственном восполнении подземных пресных вод может обеспечить потребности объектов до 10 л/с и более. В таких условиях ИВПВ исследовано недостаточно. При инфильтрации пресных вод из каналов происходит оттеснение соленых вод. При эксплуатации линз пресных вод, плавающих на соленых водах, чтобы избежать поступление соленых вод в зону пресных вод, откачивают не только пресные, но и соленые воды.

Методика эксплуатации подземных пресных вод в аридных районах и методика гидрогеологических расчетов достаточно подробно даны в работе «Линзы пресных вод

пустынь» (1963 г.). Однако вопросы искусственного восполнения в разнообразных условиях аридного климата и в особенности взаимодействия с солеными водами пока разработаны очень мало. В аридных районах не редко встречаются условия, когда в долинах расход воды в реках не только сильно меняется, но в межень прекращается, а в некоторых случаях даже паводковый сток бывает достаточным раз в несколько лет.

3. РАЙОНЫ ВЫСОКОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

В районах с сейсмичностью более 7 баллов при проектировании сооружений в системах ИВПВ следует учитывать требования СНиП II-31-74, часть II, гл. 31, а также дополнительно к нему изменения гидрогеологических, инженерно-геологических и гидрологических условий при землетрясении. Системы ИВПВ чаще всего устраивают в речных долинах на первой надпойменной террасе и даже на высокой пойме с подсыпкой или ограждениями валами от паводков. Во время землетрясений в особенности более 7 баллов в реках нередко повышается уровень воды выше наблюдаемого в обычных условиях при паводках. Затем в долинах рек для ИВПВ используются водоносные горизонты, приуроченные к рыхлым аллювиальным отложениям. Последние при землетрясениях в связи с насыщенностью водой резко ухудшают сопротивления нагрузкам от инженерных сооружений (здания, резервуары, водоводы и др.).

Водоносные горизонты, приуроченные к трещиноватым и закарстованным породам, обычно реагируют на землетрясения изменениями уровней и деформациями пород и, в частности, сдвигами и образованиями трещин, это вызывает не только изменения дебитов систем ИВПВ, но и аварии сооружений.

В районах с сейсмичностью свыше 7 баллов по СНиП рекомендуется ряд мероприятий и, в частности, при 8—9 баллах предлагается устраивать два независимых источника водоснабжения, а при 9 баллах необходимо делать запасные емкости в резервуарах. Сооружения необходимо проектировать рассредоточенно. Заложение трубопроводов по поверхности земли не рекомендуется. При проектировании сооружений ИВПВ в сейсмических районах очень важно соблюдать принцип независимости работы и управления однотипных сооружений, например отдельных скважин и их групп с водоводами, резервуарами, инфильтрационными бассейнами и сооружениями разного назначения: при нали-

чий отстойника целесообразно предусмотреть также подачу исходной воды в инфильтрационные бассейны, минуя отстойник.

4. ПРИМОРСКИЕ РАЙОНЫ

При эксплуатации прибрежных пресных подземных вод, может поступать соленая морская вода. Чтобы предотвратить поступление соленых вод в водоносный горизонт, устраивают гидравлический барьер между морем и участком эксплуатации подземных вод созданием искусственной инфильтрации пресных вод. Для инфильтрации сооружают бассейны или поглощающие скважины. Расход воды для создания защитного гидравлического барьера рассчитывают обычным гидродинамическим методом, а иногда балансовым методом по данным наблюдений за режимом подземных вод.

Для предупреждения поступления соленых вод в водозабор при рассматриваемых условиях расчет можно вести без гидравлического барьера, но с ограничением расхода водозабора. Расчет ведется гидродинамическим методом или балансовым по данным наблюдений за режимом подземных вод.

Глава XIV. САНИТАРНАЯ ОХРАНА СИСТЕМ ИВПВ

1. ЗАДАЧИ

Согласно разделу III «Основ водного законодательства Союза ССР и союзных республик» для бытового и хозяйственно-питьевого водоснабжения предусматривается охрана поверхностных и подземных вод от загрязнения с установлением соответствующих зон санитарной охраны, чтобы обеспечить их санитарно-эпидемиологическую надежность. При ИВПВ в качестве источника восполнения обычно используются поверхностные воды. В связи с этим при ИВПВ следует предусматривать санитарные охраняемые мероприятия поверхностных вод как источника восполнения, а также всех сооружений ИВПВ, включая водозабор поверхностных вод, инфильтрационные сооружения предварительного и последующего улучшения качества воды, резервуары, насосные станции, водоводы и другие сооружения.

В задачи санитарной охраны, таким образом, входит предупреждение загрязнений поверхностных и подземных вод, а также всех сооружений системы ИВПВ. Осуществить такое мероприятие можно при разработке и выполнении

мероприятий и требований, которые будут рассмотрены ниже. Имеется в виду, что санитарные условия могут быть улучшены, а в связи с этим и качество, поверхностных вод как источника ИВПВ. За соблюдением мероприятий проводится санитарный надзор. Все санитарные мероприятия выполняются в соответствии с «Основами водного законодательства Союза ССР и союзных республик», ГОСТами, указаниями, правилами и распоряжениями Министерств здравоохранения СССР и союзных республик (с их организациями). Важным нормативным материалом является СНиП II-31-74.

2. ПОЯСА (ЗОНЫ) САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ

В зависимости от условий и возможностей загрязнения в зоне санитарной охраны устанавливают два пояса: первый — строгого режима и второй — с ограничениями. При использовании поверхностных вод для основных сооружений системы ИВПВ устанавливают два пояса. Для выходящих от системы ИВПВ водоводов к потребителю назначают обычные охранные санитарные мероприятия, а водоносный горизонт за пределами первого пояса может быть включен в зону ограничений (второй пояс) в зависимости от местных санитарных условий. Организация зон санитарной охраны соответствует нормативам СНиП II-31-74 и санитарным правилам эксплуатации систем ИВПВ, устанавливаемым Министерством здравоохранения СССР.

Улучшение качества поверхностных вод как источника ИВПВ в значительной степени определяет его схему, а также и качество воды, получаемой из указанной системы. Поэтому санитарные охраняемые мероприятия распространяются на поверхностные воды (второй пояс).

Для участка водозабора поверхностных вод строгого режима (первый пояс) в зависимости от местных условий рекомендуется удаленность границ первого пояса, считая от водозабора:

для рек и каналов: вверх по течению $\nless 200$ м и вниз по течению $\nless 100$ м; по прилегающему к водозабору берегу $\nless 100$ м от линии уреза воды при самом ее высоком уровне; в направлении от прилегающего к водозабору берега при ширине реки $\nless 100$ м вся акватория и противоположный берег шириной $\nless 50$ м от линии уреза воды при самом ее высоком уровне; при ширине же реки $\nless 100$ м — полоса акватории $\nless 100$ м;

для водохранилищ (озер) — $\nless 100$ м во всех направлениях по акватории, считая от водозабора, а вдоль берега,

также считая от водозабора, полоса шириной по суше ≤ 100 м при высшем уровне воды.

Для рек и каналов границы зоны ограничений (второй пояс) устанавливают с учетом возможного загрязнения вверх по течению от водозабора при движении воды 3—5 сут (в зависимости от местных условий) в реке при 95 %-ной обеспеченности расхода, а вниз по течению реки от водозабора ≤ 250 м. Боковые границы второго пояса устанавливаются по водоразделу. Для водохранилищ и озер границы второго пояса зоны санитарной охраны определяют, исходя из продолжительности протекания воды к водозбору ≤ 5 сут при максимальной скорости течения и с учетом стоковых и ветровых условий.

Для комплекса систем ИВПВ I и II типов (включая травяные бассейны) в зону строгого режима (первый пояс) включается вся площадка сооружений. При этом границы выделенной площади от ближайшего подземного водозабора должны быть на расстоянии не менее 50 м и инфильтрационных сооружений — не менее 100 м. Эта площадка при использовании поверхностных вод в качестве ИВПВ должна доходить, как правило, до источника восполнения, т. е. берега реки, канала, озера, водохранилища. При удалении систем ИВПВ от источника восполнения площадки сооружений зона санитарной охраны (первого пояса) устанавливается исходя из приведенных выше указаний.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ

Пояса санитарной охраны устанавливаются на основании изучения условий, при которых возможно загрязнение отмеченных выше объектов систем ИВПВ, а также результатов анализа поверхностных и подземных вод. При проектировании эти зоны включают в состав проекта ИВПВ. В процессе эксплуатации ИВПВ осуществляется санитарный надзор с отбором проб и их анализом. В результате могут проводиться дополнительные санитарные мероприятия. Исследования источников водоснабжения для проектирования охранных санитарных мероприятий ведутся по программе, изложенной в приложении I к ГОСТ 17.1.3.03—77 «Правила выбора и оценка качества источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения».

В ГОСТе нет указаний по системам ИВПВ, но основные нормативы этого ГОСТа должны быть использованы с учетом специфики ИВПВ. Кроме микробиологических обычных санитарных определений (коли-индекс, общее число

бактерий в 1 мл и возможные патогенные формы) следует делать общий биологический анализ (бактерии, водоросли, простейшие, вирусы и др.).

При проектировании санитарных охранных мероприятий поверхностных вод следует учитывать также «Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами» (М., изд. Минздрава СССР, 1975). Обоснование производит та организация, для которой выполняют проектирование водоснабжения (п. 1,5 упомянутого ГОСТа).

Проектирование зон санитарной охраны выполняют в соответствии со стадиями изысканий и проектирования ИВПВ (см. приложение I). При проектировании зон санитарной охраны особенно важно изучить условия и возможности загрязнения подземных вод, а именно: имеющийся или вероятный источник загрязнения и его показатели, длину пути движения подземной воды от источника загрязнения к системе ИВПВ, скорости фильтрации, сорбционные свойства пород по отношению к химическим и биологическим загрязнителям, формирование источника загрязнения, а также периоды и продолжительности исходного загрязнения. В проекте зон санитарной охраны для стадий предварительной и детальной разведки следует выделять первый и второй пояса с аргументацией их границ.

При определении границ второго пояса зоны санитарной охраны восполняемого водоносного горизонта следует пользоваться указаниями Государственной санитарной инспекции и опубликованными работами В. М. Гольдберга [11] и др., а также рекомендациями и указаниями [28, 29 др.].

4. САНИТАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРИ ЭСПЛУАТАЦИИ ИВПВ

Организация наблюдений за охраной поверхностных и подземных вод для водоснабжения должна входить в проект зоны санитарной охраны. Следует иметь в виду, что в системах ИВПВ необходимо проводить систематические наблюдения (согласно «Правилам технической эксплуатации систем водоснабжения» [25] и Рекомендациям по проведению режимных наблюдений...» [27]).

Общий санитарный осмотр водоема и системы ИВПВ рекомендуется делать не реже 1—2 раз в месяц. Государственный санитарный надзор за устройством и эксплуатацией систем ИВПВ осуществляется органами санитарно-эпидемиологической службы. Санитарный надзор подключается на стадии проектирования. Очень важно заранее учитывать намечаемые мероприятия, которые могут повли-

ять на режим (расход, качество, уровни) поверхностных и подземных вод. Например, на одном из участков р. Северский Донец в результате регулирования стока по существу сняты паводок и затопление поймы и как следствие этого, ухудшилось восполнение эксплуатационных запасов подземных вод.

Глава XV. ИЗУЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ИВПВ

1. ЗАДАЧИ И СОСТАВ НАБЛЮДЕНИЙ

Большинство сооружений водоснабжения и в том числе систем ИВПВ оборудовано дистанционными приборами для получения данных об их работе, а также автоматическим управлением. Данные показаний приборов необходимы для анализа условий и эффективности систем ИВПВ, включая качество воды. В настоящее время искусственное восполнение в основном осуществляют за счет поверхностных вод. Конкретно организацию, задачи и состав наблюдений за системой ИВПВ рассмотрим на примере рис. 49, где показана схема для I типа ИВПВ с наблюдательными скважинами и сооружениями, за работой которых также проводятся наблюдения. Для других типов ИВПВ и их схем организации задачи и состав наблюдений несколько видоизменяются, что будет отмечено ниже. На приведенной схеме водоносный горизонт, приуроченный к пескам, подпитывается из инфильтрационных бассейнов и из реки. Вода из реки поступает через водозабор поверхностных вод на предварительную водоподготовку (отстойник, скорые фильтры и др.), затем в инфильтрационные бассейны, а из них в скважины водозабора подземных вод, куда также поступает инфильтрационная вода из реки. Из скважин вода откачивается погружными центробежными электронасосами в резервуар чистой воды и перед этим хлорируется. Из резервуара вода насосной станцией III подъема подается по водоводу потребителю.

На ряде систем ИВПВ целесообразно и даже необходимо вести общие биологические исследования воды, начиная от поверхностного источника ИВПВ, затем — в бассейнах, водоносном горизонте и в воде, получаемой из водозаборов до и после хлорирования. Кроме общих биологических исследований воды следует изучать пленку, закольматированный слой с зоной аэрации под бассейнами. Биологические исследования воды ведутся по специальным программам с

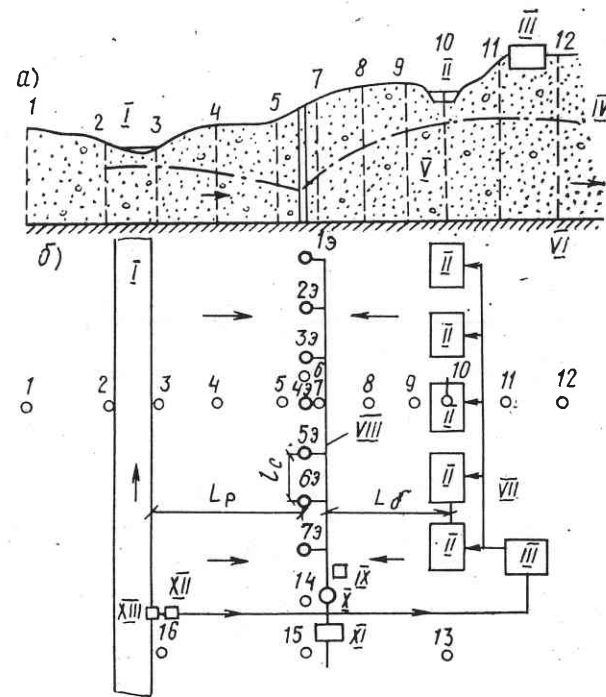


Рис. 49. Схема системы ИВПВ с показанием дополнительных наблюдательных скважин

а — разрез; б — план; I — река; II — инфильтрационные бассейны; III — предварительная водоподготовка; IV — уровень подземных вод; V — водоносный горизонт в песках; VI — подошва водоносного горизонта, глины; VII — водовод к инфильтрационным бассейнам; VIII — водозабор из подземных вод со скважинами, оборудованными электронасосами; IX — резервуар чистой воды; X — насосная станция III подъема; XI — насосная станция I подъема; XII — насосная станция II подъема; XIII — водозабор из поверхностных вод; XIV — эксплуатационные скважины; XV — наблюдательные скважины; стрелками показано направление движения воды

изучением жизнедеятельности бактерий (кроме обычного санитарного метода на коли-индекс и посева в среде МПА), водорослей, простейших, вирусов и других организмов. Для отдельных составляющих таких систем необходимы дополнительные показатели, например, для инфильтрационных бассейнов — кольматация грунта, параметры пленки; для поверхностного источника ИВПВ — толщина поверхностного льда, наличие шуги и донного льда.

Наблюдения (см. рис. 49) ведутся за состоянием поверхностных вод, работой водозабора, насосными станциями I, II и III подъемов, предварительной водоподготовкой, водозабором из подземных вод с эксплуатационными скважинами и погружными электронасосами в них (насосная станция II подъема), хлорированием и резервуарами чистой воды, а также по всем наблюдательным скважинам.

По данным наблюдений проводят анализ и делают выводы и если необходимо, изменяют режим работы системы ИВПВ и ее элементов или даже переустраивают использование дополнительных сооружений и оборудования. На основании анализа данных, полученных при эксплуатации, разрабатывают рациональный режим работы отдельных элементов и даже всей системы ИВПВ. В проектах систем ИВПВ или дополнительно к ним целесообразно разрабатывать программы обязательных наблюдений и исследований их работы.

2. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ИВПВ

Наиболее совершенная организация наблюдений и изучение эксплуатации ИВПВ со всей системой водопровода — водоводами, распределительной сетью, резервуарами и прочим — может быть при дистанционной передаче показателей работы объектов при автоматическом управлении. Без автоматического управления с дистанционной подачей показателей работы объектов системы ИВПВ может быть диспетчерское рациональное управление. Без дистанционной подачи показателей и при наличии самопишущих измерительных приборов данные будут поступать периодически, но анализ можно сделать с соответствующими выводами о рационализации эксплуатации. Без указанных выше приборов с интегральными показаниями расходов по всей системе ИВПВ (лучше по отдельным объектам, включая скважины) при эпизодическом взятии проб воды и дополнительных исследованиях объекта, например, с опытной откачкой (эксплуатационной) из скважины и с периодическими замерами расходов (без постоянного водомера) — выводы будут более скромные.

Наблюдения за уровнями воды, ее температурой, мутностью и цветностью могут быть легко автоматизированы с дальнейшей дистанционной передачей на пульт управления. В настоящее время разработан ряд таких приборов. Используя в основном работу [22], приведем некоторые сведения по аппаратуре автоматизации для получения показателей работы в системе ИВПВ.

Для непрерывного контроля изменения уровней в открытых резервуарах можно воспользоваться поплавковым уровнемером РП-1065 с реле РМ-51, который будет сигнализировать о предельных положениях уровня воды. Для любых непрерывных изменений уровня в открытых резервуарах применяют поплавковое устройство с датчиком

ДСУ-1 и приемниками УСП-1 или УСП-2. В скважинах можно установить электрические уровнемеры. Электродный сигнализатор уровня ЭРСУ-2 выпускается рязанским заводом «Теплоприбор». Этот прибор предназначен для сигнализации двух-трех положений уровня.

Автоматические расходомеры воды могут давать дистанционные показания и на месте мгновенного расхода или расхода за любой промежуток времени. Чаще всего для скважин и насосных станций применяют дросселирующие водомеры с плавно суживающимся и затем расширяющимся сечением или в виде вставок разных форм суживания и расширения вплоть до тарельчатых вставок с отверстием. Реже используются скоростные водомеры. Для скважин заслуживает внимание водомер проф. И. И. Куколевского в виде колена.

Измерение расхода воды в этом приборе основано на разности давлений воды в выпуклой и вогнутой внутренних поверхностях этого колена. Важно, что потеря давления на дополнительное измерение расхода, как в предыдущих типах водомеров, нет. Этот водомер занимает меньше места, но точность его измерений ниже существующих. В водопроводной практике чаще используют манометрические и электрические термометры; последний тип термометров удобен для передачи на расстояние. Термисторы (полупроводниковые электрические термометры) благодаря простоте устройства и высокой чувствительности к изменению температуры могли бы получить большее распространение, но пока они не отличаются стабильностью характеристик.

Очень важно автоматизированное получение показателей качества воды, данных по мутности, цветности и остаточному хлору. Автоматические приборы АМЦ-V, АОХ и АМС-V для определения указанных показателей созданы в АКХ им. К. Д. Панфилова в содружестве с Восточной очистной станцией Московского водопровода. Автомат АМС-V позволяет получить непрерывно или периодически показатель мутности в пределах 0—45 мг/л. Мутность воды может дистанционно регистрироваться самопишущим прибором ЭМД-262 с реостатными датчиками. Автоматический анализатор АМЦ-V дает показания цветности и мутности (в пределах 0—4 мг/л). С помощью автоматического анализатора АОХ определяют концентрацию остаточного хлора.

3. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИСТОЧНИКОМ ИВПВ И ВОДОЗАБОРОМ ИЗ НЕГО

В качестве источника ИВПВ чаще используют поверхностные воды. Качество этих вод в значительной степени зависит от санитарных охранных мероприятий, поэтому должен быть организован систематический надзор за соблюдением этих мероприятий. Его обычно выполняют органы санитарной охраны или по согласованию управления водопровода с санитарной инспекцией его возлагают на специалистов системы водоснабжения. На участке водозабора проводят не менее 3 раз в месяц наблюдения за общим состоянием водоема — развитием планктона, размывами, наносами, заиливаниями, толщиной льда, донным льдом, шугой, в особенности около самого водозабора поверхностных вод. Кроме того, у водозабора должны 2—3 раза в день измерять температуру и уровень воды. При ИВПВ из реки по этим уровням вычисляют расходы системы; при малых расходах последние измеряют гидравлическими методами. В этом случае можно воспользоваться наблюдениями постов и станций Гидрометеослужбы. После поступления поверхностной воды в водозабор через решетку и сетку уровень измеряется также 3 раза в сутки; по разности уровней воды до входа в водозабор и после решетки (сетки) определяют потери на трение, которые должны быть меньше допустимых. Перед водозабором и после решетки (сетки) 1 раз в сутки отбирают пробы на мутность воды. Затем 1 раз в 10 дней берут пробы на сокращенный анализ воды (приложение III); в весенний паводок, в летний и зимний межени — на полный анализ воды (приложение II). По водозабору поверхностных вод получают сведения о состоянии решеток и сеток (при наличии последних), а также их очистки. При наличии оголовка водозабора в реке состояние его проверяют не реже 3 раз в месяц.

4. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИНФИЛЬТРАЦИОННЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ

Для I типа ИВПВ наблюдения ведут за инфильтрационными бассейнами и каналами, для II типа — за инфильтрационными скважинами, для III типа — за естественными площадями инфильтрации и, наконец, за отдельно выделенными нами травяными покровами. В инфильтрационных бассейнах и каналах наблюдения ведут за температурой, мутностью и качеством воды, поступающей в них, за расходом ее, скоростями инфильтрации, во все периоды ра-

боты за уровнями воды, а в зимней период — за толщиной льда. Наблюдения за температурой, мутностью, расходом воды и ее уровнем ведутся 1—3 раза в сутки. Пробы на сокращенный анализ берут 1—3 раза в месяц из $1/2$ — $1/3$ числа бассейнов, на полный анализ 2—3 раза в год в характерные периоды из $1/2$ — $1/3$ бассейнов. Толщину льда проверяют 3 раза в месяц. Чтобы лед не проваливался, поддерживают необходимый уровень воды. При опоражнивании бассейна без подпора (учитывая только пленку дна) его фильтрационное сопротивление A_0 можно определить, пользуясь зависимостью Г. Н. Каменского:

$$A_0 = t/2,3 \lg \left[\frac{H_0 + m_{пл}}{(H_0 - S) + m_{пл}} \right], \quad (112)$$

где $A_0 = m_{пл}/k_{пл}$ сут; $m_{пл}$ — толщина пленки, м; $k_{пл}$ — коэффициент фильтрации пленки; t — время опыта, сут; S — понижение уровня воды от начального, м, за время t ; H_0 — начальная глубина уровня в бассейне, м.

Пример 10. Требуется определить A_0 и $k_{пл}$. Известно $t=6$ сут, $H_0=2$ м, $S=1,8$ м, $m_{пл}=0,01$ м.

$$A_0 = \frac{6}{2,3 \lg \left(\frac{2 + 0,01}{(2 - 1,8) + 0,01} \right)} = 2,6 \text{ сут.}$$

$$k_{пл} = \frac{m_{пл}}{A_0} = \frac{0,01}{2,6} = 0,0038 \text{ м/сут.}$$

Для приближенных расчетов и при свободной фильтрации под пленкой ее толщиной можно пренебречь.

При чистке бассейна примерно в пяти—десяти местах его площади следует исследовать пленку и ее параметры: толщину $m_{пл}$, коэффициент фильтрации $k_{пл}$, массу скелета пленки $\delta_{пл}$, кольматацию песков на глубинах 5, 10, 25 и 50 см. Толщину пленки определяют в натуре, а $k_{пл}$ и $\delta_{пл}$ — лабораторным методом.

По данным наблюдению при эксплуатации за работой бассейна в первый период (до начала образования илстой пленки) грязеемкость G , кг/м², т. е. кольматацию рыхлых пород, можно определить по формуле

$$G = M v_{ср} t_k, \quad (113)$$

где M — средняя мутность, кг/м³ (или мг/л); $v_{ср}$ — средняя скорость инфильтрации, м/сут; t_k — время кольматации, сут.

После опоражнивания бассейна грязеемкость определяют также лабораторным методом, сравнивая закольматированный и незакольматированный грунты.

В процессе эксплуатации фильтрационное сопротивление A_0 определяют по формуле

$$A_0 = (H_0 + m_{пл}) / v_{и}, \quad (114)$$

где $v_{и}$ — скорость инфильтрации, м/сут.

При определении A_0 по формуле (114) $m_{пл}$ за малостью можно пренебречь. В процессе эксплуатации следует также определять параметры илстой пленки, принимая ее сжимаемой (по Я. Я. Спрогису).

Расход и уровень воды в инфильтрационных скважинах проверяют 1—3 раза в сутки. Кроме того, 3—6 раз в год устанавливают как изменяется приемистость скважин; по расходу и уровню в них определяется удельная приемистость, по которой и делают вывод о необходимости ремонта скважины. Наблюдения за инфильтрационными площадями III типа ИВПВ и за травяными покрытиями заключаются в обследовании и поддержании их фильтрационных свойств. Заиленные площади III типа ИВПВ после прослушивания боронуют. Травяные покрытия периодически скашивают и следят за уровнем воды.

5. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВОДОЗАБОРОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Рассмотрим организацию наблюдений и исследований за водозабором подземных вод для конкретных условий схемы ИВПВ на рис. 49. Эксплуатационные скважины оборудованы гравийными фильтрами. Откачиваемая вода из скважин подается погружными центробежными электронасосами по сборному водоему в резервуар чистой воды. В скважинах необходимо замерять статические и динамические уровни, а также расходы воды. Кроме того, отбирают пробы воды на анализ. Так как в системах ИВПВ хлорируется вода, то пробы на бактериологический анализ берут после хлорирования 1 раз в сутки при населении менее 50 000 чел., 3 раза в неделю при населении 20 000—50 000 чел. и 1 раз в неделю при населении до 20 000 чел. Пробы на сокращенный анализ (прил. III) берут из каждой скважины 1 раз в месяц, из суммарного расхода воды перед хлорированием 3 раза в месяц и на полный анализ (прил. II) 1 раз в год из $1/2$ числа скважин, а также из суммарного расхода воды. При наличии автоматических дистанционных приборов регистрацию уровней и расходов скважин записывают в журнал не реже 6 раз в сутки. Где нет дистанционных приборов, при наличии водомеров расходы измеряют 1 раз в сутки по каждой скважине, а по общему водомеру — на сборном водоводе. Общий расход насосной станции

III подъема (подача к потребителю) определяют 6 раз в сутки. Для налаживания рациональной эксплуатации системы ИВПВ вместе с водопроводом в целом важна непрерывная запись показателей уровней воды и в особенности расходов скважин. Измерение уровней в каждой скважине, а также ее расхода позволяет следить за изменением ее удельной подачи, т. е. за удельным дебитом $q = Q_c / S$, где Q_c — дебит скважины, м³/сут; S — понижение уровня от условно статического (при остановке данной скважины и работе остальных скважин водозабора). Уменьшение удельного дебита со временем показывает, что сопротивления около скважины и при входе в скважину увеличились. Когда дебит рассматриваемой скважины уменьшается и составляет около $1/2$ — $1/3$ расчетного для данной скважины, тогда после технико-экономического анализа осуществляют регенерацию или замену фильтра. На схеме ИВПВ около эксплуатационной скважины 4а находится наблюдательная затрубная скважина 5. По разности уровней в скважинах 5 и 4а (рис. 49) можно судить о сопротивлениях при движении воды в скважину.

Кроме работы собственно скважин в рассматриваемой схеме следует проверять работу погружных центробежных электронасосов. Прежде всего должно быть предусмотрено текущее наблюдение за расходом насоса (см. выше) и работой электродвигателя с приборами. Лучше всего это осуществляется при дистанционной подаче показателей и автоматическом управлении. Специально для скважинных насосов выпускаются унифицированные станции автоматического управления ПЭХ. Запуск погруженных центробежных электронасосов не требует предварительной заливки водой, так как они должны устанавливаться, примерно, на 1—1,5 м ниже динамического уровня. По данным показаний о фактической подаче погружных центробежных электронасосов, расходе энергии, давлений перед задвижкой у скважины и после задвижки и по данным сравнения с заводской характеристикой насоса делается анализ о КПД насоса и выводы о дальнейшей его работе. Не менее 1—2 раз в год погружной электронасос извлекают и разбирают, затем определяют необходимость его ремонта или замены.

Наблюдения при другом типе водозабора имеют особенности. Так, при сифонном водозаборе постоянные водомеры в каждой скважине устанавливают редко. Вместо того, чтобы наблюдать за работой погружных электронасосов, поддерживают надлежащий вакуум в сифонной трубе. Задвижка у каждой скважины необходима, чтобы отключать

ее от всего сифона. Состояние скважин во время эксплуатации дополнительно определяют специальной опытной откачкой. Наблюдения при горизонтальных самотечных водозаборах ведут очень просто. Расход проверяют при эксплуатационной откачке из сборной камеры (колодца). Уровни в таком водозаборе замеряют в смотровых колодцах через пропущенные наблюдательные трубки. Следует отметить, что целый ряд составляющих наблюдений — объекты, точки, сроки и прочее — уточняют для конкретных объектов.

6. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА РЕЖИМОМ УРОВНЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СИСТЕМЕ ИВПВ

Одна из схем ИВПВ и распределение минимального числа наблюдательных скважин показаны на рис. 49. Наблюдения за уровнями воды в наблюдательных и эксплуатационных скважинах вместе с наблюдениями за уровнем в реке, а также расходами из эксплуатационных скважин $Q_{в}$ и расходом, подаваемым в инфильтрационные бассейны $Q_{б}$, позволяют сделать ряд важных выводов. Наблюдения за уровнями подземных вод желательно вести с помощью автоматов с дистанционной передачей показателей. При отсутствии таких приборов наблюдения проводят 5—10 раз в месяц.

На половине участка системы ИВПВ от линии наблюдательных скважин 1—11 к линии скважин 15—12 строится карта гидроизогипс. При одинаковых гидрогеологических условиях на другой половине участка карта гидроизогипс строится по аналогии. По построенной карте гидроизогипс при известных средних мощности H и коэффициенте фильтрации водоносного слоя можно определить приток грунтовых вод к эксплуатационным скважинам от реки $Q_{вр}$ и из бассейнов $Q_{нб}$. Этот суммарный приток $Q_{вр}$ и $Q_{нб}$ сравнивают с расходом воды (по водомерам), откачиваемой из скважин $Q_{в}$, и уточняют действительный расход.

По карте гидроизогипс определяют утечку воды из бассейнов $Q_{бу}$, поступающей в реку. Расход, подаваемый в бассейны, $Q_{б}$ сравнивают с суммой расходов, поступающих из бассейна в водозабор $Q_{ив}$ (ΔQ) и в реку $Q_{бу}$, а затем последние расходы уточняют. На основании этого по формулам (58), (62) определяют КПД инфильтрационных сооружений $\eta_{и}$, КПД $\eta_{и}$ чаще всего бывает около 0,5, но доходит до 0,85 (в системе ИВПВ долины р. Арагви). Этот коэффициент выгодно повышать (см. рис. 49).

По данным наблюдательных скважин 2—5 и 8—10, зная параметры водоносного горизонта, можно определить скорости фильтрации и действительные скорости воды в водоносном горизонте из реки и бассейнов к водозаборах. Эти данные нужны для расчетов барьерной роли водоносных горизонтов при пакетном загрязнении поверхностных вод (с учетом сорбции водоносного горизонта, см. главу V).

Наблюдательная скважина 5 (см. рис. 49) нужна, как отмечалось, для оценки сопротивлений при движении грунтовой воды около скважины и в скважину 4э. Наблюдения за уровнями в наблюдательных скважинах 1 и 2 с учетом замеров уровня воды в реке нужны, чтобы выяснить сопротивление русла реки, а также возможность отрыва уровня грунтовых вод от реки. Наблюдательная скважина 10 в инфильтрационном бассейне необходима для определения мощности зоны аэрации и ее изменения, а также для возможности улучшения качества воды в зоне аэрации (с учетом дополнительных скважин). Чтобы понять роль очищающей способности водоносного горизонта при движении поверхностной воды от реки и бассейнов к водозаборах проводят наблюдения за уровнями воды в бассейне и реке в наблюдательных скважинах 2, 3, 5, 7, 8, 9 и эксплуатационной скважине 4э. Кроме того, на указанных объектах отбирают пробы воды на анализ. При этом из всех наблюдательных скважин для взятия пробы необходимо откачивать воду насосом не менее 1 ч с подачей 1 м³/ч и более.

Глава XVI. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ИВПВ

Экономический анализ при проектировании систем ИВПВ осуществляют путем сравнения с другими вариантами источников водоснабжения, включая возможные варианты системы ИВПВ. Кроме того, проводят экономический анализ и анализ отдельных элементов системы ИВПВ, например вариантов отстойников. Сравнивают варианты инфильтрационных бассейнов с предварительным отстаиванием и вариантами фильтрационных бассейнов без предварительного отстаивания, но с выключением этих бассейнов во время паводков, с питанием водозабора только из реки при высоком уровне воды или с созданием емкостных запасов. При сравнении необходимо учитывать также удаленность сравниваемых вариантов источников водоснабжения до потребителя, а также наиболее эффективное использование источника водоснабжения в этой системе в целом.

При разработке различных вариантов источников водоснабжения следует предусматривать автоматическое регулирование требуемых расходов и напоров. Автоматизация при рациональном ее применении снижает себестоимость воды и трудоемкость эксплуатации источников водоснабжения. При сравнении различных вариантов источников водоснабжения необходимо оценивать санитарную надежность источника водоснабжения, учитывая, в частности, барьерные возможности систем ИВПВ по отношению к загрязнению.

При вариантах ИВПВ, особенно со значительными колебаниями уровней подземных вод, и в частности, при магзинировании важно предусмотреть возможность снижения подъема воды из водозабора и КПД погружных центробежных насосов. Последние обычно применяют при глубине динамического уровня более 6—8 м от поверхности земли. Эффективность работы источника водоснабжения зависит от потребности в воде, природных условий, размеров ресурсов поверхностных и подземных вод, их качества, наличия свободных и удобных площадей эксплуатации. Технико-экономический анализ вариантов источников водоснабжения необходим не только для учета данных условий, но также и для возможности их изменения. Например, может улучшиться качество исходных поверхностных вод в результате введения охранных мероприятий и устройства водохранилищ с изменением режима поверхностных вод, используемых для ИВПВ. При экономическом анализе реконструкции или рационализации системы ИВПВ сравнивается себестоимость воды до и после мероприятий.

В качестве основного экономического показателя для сравнения различных вариантов согласно «Типовой методике определения экономической эффективности капитальных вложений» (М., Экономика, 1969) приведенные затраты определяют по формулам:

$$C_1 + E_n K_1 = \min, \quad (115)$$

$$T_n C_1 + K_1 = \min, \quad (116)$$

где C_1 — текущие затраты (себестоимость) по каждому варианту; K_1 — капитальные затраты по тому же варианту; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; T_n — нормальный срок окупаемости капитальных вложений (величина, обратная E_n).

Нормативный коэффициент эффективности в соответствии с приведенной типовой методикой следует принимать не ниже 0,12; тогда нормативный срок окупаемости будет не более 8,3 года. Однако при необходимости по согласованию с Госпланом СССР допускаются отклонения от реко-

мендуемых величин нормативных коэффициентов и срока окупаемости капитальных вложений.

При сравнении вариантов приведенные затраты определяют по всей продукции (получаемой воде) для одного года. Не следует смешивать расход воды, подаваемой рассматриваемыми сооружениями, с расходом воды, подаваемой к потребителю. Последний будет меньше за счет утечек и собственного потребления для водопровода (промывка сети и пр.). Себестоимость и приведенные расходы всего водопровода определяются для капитальных вложений всех сооружений водопровода, включая сеть труб, а также для всех текущих затрат на его эксплуатацию. Можно также приведенные затраты по формулам (115) и (116) относить к 1 м³ воды, разделив их на расход воды в течение года. Тогда мы получим удельные приведенные затраты по каждому варианту, отнесенные к 1 м³ воды.

При различных вариантах источников водоснабжения можно и целесообразно анализировать экономические показатели получения воды только на сравниваемых участках с учетом подачи (транспортирования) воды до потребителя (без распределительной сети).

Все сравниваемые варианты приводятся к сопоставимому виду и, в частности, по срокам капитальных вложений приведением затрат поздних лет к текущему моменту с введением коэффициента приведения B по формуле

$$B = [(1 + E_{н.п})^t]^{-1}, \quad (117)$$

где t — период времени приведения, годы; $E_{н.п}$ — норматив для приведения разновременных затрат, равный 0,08 (в условиях действующего порядка начисления амортизации).

Действительный срок окупаемости капиталовложений определяется по формуле.

$$T_d = K / (C_{пр} - C_1), \quad (118)$$

где $C_{пр}$ — продажная стоимость воды.

В некоторых случаях, например при развитии водоснабжения города, вариант дополнительного источника с подачей воды со стороны существующего водозабора следует сравнивать с вариантом дополнительного источника с другой стороны города с учетом затрат на реконструкцию сети, так как при последнем варианте затраты на эту реконструкцию сети будут меньше: получается один вариант с полной подачей воды, с одной стороны, и второй вариант с двух сторон из существующего и нового источника водоснабжения. Однако и при варианте развития существующего водозабора с односторонним поступлением воды в сеть водо-

снабжения следует учесть, что в ряде случаев может получаться удешевление за счет дополнительного использования неполной пропускной способности водоводов, мощности насосных станций, наличия дорог, административных помещений, близости электроснабжения и пр.

При определении сравнительной экономической эффективности капитальных вложений при реконструкции действующих предприятий сравнивают показатели по вариантам реконструкции с показателями предприятий до реконструкции и в соответствующих случаях с вариантами нового строительства. При этом учитывают потери продукции и прибыли, а также увеличение текущих затрат в период реконструкции.

Показателем эффективности при реконструкции предприятия и, в частности, при сравнении по отдельным вариантам является срок окупаемости капитальных вложений в такую реконструкцию $T_{к.с}$, определяемый по формуле

$$T_{к.с} = K_p / (C_1 - C_2), \quad (119)$$

где K_p — капиталовложения в реконструкцию предприятия; C_1 и C_2 — себестоимость продукции до и после реконструкции (увеличение прибыли при $C_2 < C_1$).

Расчет по формулам (118) и (119) следует выполнять также с учетом изменения общего расхода реконструируемого сооружения, а сравнивать экономическую эффективность — по удельным показателям, отнесенным к расходу 1 м³ воды. Такое замечание, в частности, относится к реконструкции берегового инфильтрационного водозабора, когда нужно увеличивать его расход при увеличении водопотребления, а также в связи с заиливанием русла реки (последнее уменьшало расход берегового инфильтрационного водозабора); при такой реконструкции имеется в виду дополнительное искусственное подпитывание подземных вод. В результате сооружения искусственного восполнения подземных вод расход существующего водозабора увеличивается, а стоимость воды обычно уменьшается. Эффективность искусственного восполнения в данном случае, по существу, определяется не только экономическими показателями по формуле (115), но и тем, что при увеличении расхода водозабора подземных вод будут увеличиваться водопотребление и улучшаться гигиенические условия. Последнее также дает экономическую эффективность, но в формуле (115) это не учитывается.

При рассмотрении реконструкции берегового водозабора с устройством дополнительного искусственного восполнения подземных вод нередко динамический уровень воды

Таблица 19. Технико-экономические показатели ИВПВ при разной предварительной водоподготовке и сравнение с использованием поверхностных вод с полной их очисткой по капитальным вложениям, текущим и приведенным затратам

Назначение вложений и затрат	Искусственное восполнение подземных вод при водоподготовке												
	Поверхностные воды при расходах, м³/сут			Аэрация		Отстаивание и аэрация		Фильтрование на скорых фильтрах, аэрация		Отстаивание, фильтрование, аэрация		Микрофильтрация, фильтрование, аэрация	
	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	При расходах, тыс. м³/сут												
Капитальные вложения в тыс. руб. в год													
Очистные сооружения поверхностных вод	569,8	852,0	—	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9
Склад хлора и песка	16,0	16,9	—	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9
Наружные коммуникации	60,0	80,0	—	112,3	224,7	119,2	238,4	113,0	226,0	120,0	240,0	115,0	230,0
Водоводы	600,0	960,0	—	381,8	570,0	381,8	570,0	381,8	570,0	381,8	570,0	381,8	570,0
Инфильтрационные бассейны	—	—	—	57,6	115,2	57,6	115,2	57,6	115,2	57,6	115,2	57,6	115,2
Остойные бассейны	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Скорые фильтры	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Микрофильтры	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Скважины	—	—	—	236,5	472,9	236,5	472,9	236,5	472,9	236,5	472,9	236,5	472,9
Итого	1246,7	1909,9	805,1	1399,7	860,6	1528,6	995,8	1711,0	1060,4	1840,0	1127,2	1870,0	—
Итого с поправками	1350	2010	910	1500	970	1630	1100	1810	1160	1940	1230	1970	—

[illegible]

Всего	330,4	536,6	217,4	390,1	236,7	428,4	264,6	468,2	283,2	506,1	296,5	511,1
Всего с поправками	392,0	632,0	267,2	460,0	286,4	505,6	312,0	537,0	399,2	582,8	347,6	596,4

Таблица 20. Удельные себестоимость и капитальные затраты, коп., на 1 м³ воды ИВПВ при разной водоподготовке и сравнение с использованием поверхностных вод (с поправками)

Источник водоснабжения и очистка	Расход, тыс. м³/сут	Себе- стоимость	Приведенные затраты
Поверхностные воды с полной очисткой	50	1,26	2,16
	100	1,04	1,73
ИВПВ с вариантами водоподготовки:			
аэрация	50	0,88	1,46
	100	0,77	1,26
отстаивание и аэрация	50	0,93	1,57
	100	0,85	1,39
фильтрование на скорых филь- трах и аэрация	50	0,99	1,71
	100	0,88	1,47
отстаивание, фильтрование, аэра- ция	50	1,10	1,86
	100	0,96	1,60
микрофильтрация, фильтрование, аэрация	50	1,10	1,90
	100	0,99	1,64

Из табл. 19 следует, что варианты с искусственным восполнением подземных вод по удельным приведенным затратам в 1,48—1,14 раза дешевле по сравнению с вариантом использования речной воды с полной ее очисткой. При принятых условиях удорожание отдельных вариантов искусственного восполнения подземных вод определяется удорожанием (усложнением) предварительной водоподготовки. При варианте искусственного восполнения подземных вод с предварительной довольно сложной водоподготовкой, включающей микрофильтрацию и аэрацию, удель-

ные приведенные затраты будут все же на 5—15% меньше, чем при использовании поверхностных вод с полной их очисткой. Искусственное восполнение подземных вод с аэрацией — самый дешевый вариант, на 37—48% дешевле варианта использования поверхностных вод с полной очисткой. Следует отметить, что во всех вариантах принято хлорирование воды. Последнее определяется необходимостью доведения качества воды до ГОСТ 2874—73 по бактериологическим показателям в случае ухудшения воды в водозаборах подземных вод и для предупреждения ухудшения качества воды в водоводах и водопроводной сети.

При увеличении подачи воды с 50 до 100 тыс. м³/сут удельная себестоимость рассмотренных вариантов уменьшается на 9—21% и приведенные затраты — на 13—25%. При изменении принятых выше условий показатели экономического анализа вариантов могут меняться.

Качество воды при ИВПВ обычно лучше, чем при полной очистке поверхностных вод. В частности, вода, получаемая при искусственном восполнении, имеет значительно меньшие амплитуды колебаний температуры: летом более прохладная, а зимой — более теплая, чем поверхностная вода. Кроме того, при искусственном восполнении могут быть получены емкостные запасы подземных вод. В некоторых случаях возможность создать емкостные запасы подземных вод при недостатке расхода реки в межень является весьма важным показателем, определяющим выгодность и рациональность ИВПВ.

При расходе водозаборов меньше 50 тыс. м³/сут соотношение себестоимости воды при искусственном восполнении подземных вод по сравнению с полной очисткой речных вод будет еще более выгодным, чем указано ранее. Следует отметить, что для малых водозаборов вариант искусственного восполнения подземных вод с инфильтрационными бассейнами (и только аэрацией) особенно рационален по сравнению с полной очисткой речной воды, так как значительно проще техническое обслуживание.

По последним данным, стоимость 1 м³ воды водозаборов РСФСР (без Москвы и Ленинграда) была в среднем для водозаборов с очисткой воды (в основном из рек) 3,37—5,62 коп. (средневзвешенная стоимость 3,75 коп. за 1 м³ воды) и для водозаборов без очистки (из подземных вод) — 3,9 коп. В Риге себестоимость воды при искусственном восполнении с инфильтрационными бассейнами и аэрацией составляла около 1,87 коп. за 1 м³. При этом КПД $\eta_{\text{и}}$ (отношение расхода воды за счет искусственного восполнения подземных вод к расходу, подаваемому на инфи-

трационные бассейны) был около 0,45—0,5, т. е. довольно низкий. После дополнительной реконструкции этой системы искусственного восполнения КПД увеличился примерно до 0,7, а себестоимость дополнительно получаемой воды составила около 0,92 коп.; срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составил всего 2,2 года. Чистая годовая экономия от такой реконструкции с увеличением $\alpha_{\text{и}}$ получилась 104 тыс. руб.

Как видно из табл. 20, стоимость 1 м³ воды при искусственном восполнении по приведенным затратам изменяется от 1,26 до 1,9 коп./м³. Фактическая себестоимость воды в эксплуатационных системах ИВПВ с бассейнами составляет в среднем около 2 коп. за 1 м³, в отдельных случаях снижается до 0,7 коп за 1 м³ (долина р. Арагви) и в некоторых системах ИВПВ Западной Украины повышается до 3,5 коп. за 1 м³. В системе ИВПВ района Прибалтики с инфильтрационными бассейнами без предварительной водоподготовки общая себестоимость 1 м³ воды всего водозабора после реконструкции составляет около 1,7 коп., а в другой системе ИВПВ тоже с инфильтрационными бассейнами, но с предварительным осветлением — всего 1,6 коп. за 1 м³ воды. Удорожание себестоимости свыше 2 коп. за 1 м³ воды, по имеющимся у нас данным, определяется несовершенством схемы и эксплуатации. Самая дешевая себестоимость воды в долине р. Арагви определяется особо благоприятными условиями — вся система ИВПВ самотечная.

Особенно целесообразно и эффективно искусственное восполнение применять для увеличения расхода существующих береговых инфильтрационных водозаборов.

По данным экономических расчетов искусственное восполнение подземных вод даже в суровых условиях северо-востока Азии (СССР) оказывается конкурентноспособным. В районах многолетней мерзлоты себестоимость 1 м³ воды дороже, чем в районах умеренного климата, и зависит от условий способа ИВПВ (табл. 21) [20].

В условиях Севера стоимость 1 м³ воды при использовании поверхностных вод с полной их очисткой редко дешевле 20—30 коп. При небольших потребностях из-за сложности и дороговизны подачи воды по трубопроводам ее доставляют потребителю автотранспортом; при этом себестоимость воды при расстоянии 20 км составляет 3 р. 20 коп. за 1 м³, т. е. очень дорого. Таким образом, даже в суровых условиях Севера системы ИВПВ являются в соответствующих случаях конкурентноспособными и уже работают для некоторых объектов водоснабжения.

Таблица 21. Стоимость 1 м³ подземной воды искусственного восполнения в области многолетней мерзлоты

Способ искусственного восполнения подземных вод	Себестоимость 1 м³ воды, коп.
Перекачка воды вверх по долине реки в надмерзлотных водах	7
Искусственное создание таликов в мерзлых породах путем гидравлического оттаивания	15
То же, путем электрического оттаивания	140
Устройство барража в надмерзлотных подземных потоках	12
Нагнетание пресных вод через поглощающие скважины в подмерзлотные и межмерзлотные воды	5*
Откачка воды в летний период из сквозного талика	20

* Вероятно, дороже 5 коп., даже без стоимости водоподготовки.

Стоимость подземной воды при искусственном восполнении за рубежом приведена в табл. 22.

Таблица 22. Стоимость 1 м³ воды при искусственном восполнении за рубежом

Город (страна)	Год	Расход, млн. м³/год	Стоимость 1 м³ воды, франки
Дортмунд (Рур, ФРГ)	1967	100	0,14—0,19
Круасси-Сюр-Сен (Франция)	1967	10	0,29
Базель (Швейцария)	1967	49	0,12
Калифорния (США, четыре участка)	1965	300	1,6—2,48
Аламитос (США)	—	—	0,9—0,32

Для зарубежных стран капиталовложения при искусственном восполнении с бассейнами и каналами на 1 м³ воды составляют без предварительной водоподготовки в среднем 0,14 франка и с водоподготовкой в среднем 0,36 франка, т. е. в последнем случае примерно в 2,5 раза дороже, чем без водоподготовки. При искусственном же восполнении подземных вод с инфильтрацией через скважины без водоподготовки 1 м³ воды стоит в среднем 0,032 франка (от 0,029 до 0,100), а с водоподготовкой — 0,125 франка (от 0,10 до 0,15), т. е. с водоподготовкой в 4 раза дороже. Удельные капиталовложения мало изменяются от расхода воды. За рубежом структура капиталовложений и эксплуатации несколько иная, чем в СССР. Капиталовложения и

себестоимость за рубежом приведены в ценах до 1970 г. без учета инфляции.

Конечно, искусственное восполнение подземных вод целесообразно там, где для этого имеются надлежащие условия. Как отмечено выше, сравнительную экономическую оценку искусственного восполнения подземных вод с другими вариантами следует делать по показателям капитальных вложений, приведенных затрат (годовых и удельных) и себестоимости 1 м³ воды по «Типовой методике определения экономической эффективности капитальных вложений».

Глава XVII. РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ В СИСТЕМАХ ИВПВ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Под рационализацией систем ИВПВ подразумевается улучшение их отдельных элементов и системы в целом. Основным показателем рационализации является экономическая эффективность, которая для новых систем ИВПВ определяется как минимум приведенных затрат при сравнении конкурирующих вариантов таких систем, а также других источников водоснабжения, а для эксплуатируемых систем ИВПВ путем сравнения себестоимости воды до и после рационализации. По этим показателям может быть подсчитана годовая и общая экономия.

При рационализации следует также учитывать изменение трудоемкости, материалоемкости и фондоемкости получаемой воды, продолжительность осуществления рационализации и другие факторы.

При ИВПВ для водоснабжения существенное значение может иметь увеличение расхода этих систем, повышение надежности их работы при получении воды высокого качества. В некоторых случаях при рационализации систем ИВПВ можно еще дополнительно улучшать качество воды по сравнению с кондициями по ГОСТ 2874—73. Например, температура воды в системе ИВПВ по сравнению с поверхностной не испытывает больших колебаний, что по гигиеническим и бытовым показателям более благоприятно. Умеренная (не холодная) температура водопроводной воды зимой, когда ее подогревают, также более выгодна. Такие элементы, как надежность системы и более высокое качество воды в применяющихся показателях экономической эффективности не учитывают. Системы ИВПВ по надеж-

ности получения требуемого количества и качества воды имеют преимущества перед водоснабжением с обычной очисткой поверхностных вод.

Вода, получаемая из систем ИВПВ, обычно дешевле не только поверхностных вод с полной их очисткой, но даже подземных вод, в особенности артезианских; в последнем случае это объясняется меньшей высотой подъема воды в системах ИВПВ и обычно большей их компактностью. Но несмотря на это, возможно и дальнейшее удешевление воды систем ИВПВ путем их рационализации.

2. ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ

По вопросам теории и методики ИВПВ опубликовано ряд работ [5, 10, 28, 29 и др.]. Рационализация систем ИВПВ проводится на ряде объектов в СССР и за рубежом. Однако только недавно начали публиковаться теоретические и методические статьи по рационализации систем ИВПВ (Н. А. Плотников, 1979 [21], А. Ф. Порядин, 1979 [23] и др.). В период изысканий источников водоснабжения, включающих варианты систем ИВПВ, при проектировании и эксплуатации систем следует изучать возможности их рационализации. При изысканиях необходимо проведение целеустремленных исследований природных, санитарных и прочих условий, чтобы получить достаточные данные для анализа возможности рационализации систем при проектировании. Изучение возможностей рационализации систем ИВПВ следует продолжать при их эксплуатации, накапливая данные о работе элементов системы. Кроме того, должен проводиться анализ этих данных с учетом того, что все элементы системы ИВПВ взаимосвязаны. Поэтому при рационализации и изменении режима в одном элементе системы ИВПВ необходимо проверять работу других элементов. Например, увеличение скоростей движения воды в инфильтрационных бассейнах может ухудшить качество воды, получаемой из водозаборов подземных вод, или гидродинамический КПД и этих инфильтрационных бассейнов. Некоторое ухудшение показателей отдельных элементов может быть допустимым. Например, при интенсификации работы инфильтрационных бассейнов и фильтрации в водоносном горизонте может немного ухудшаться показатель коли-индекс в воде водозабора, но при последующем хлорировании вода будет иметь высокие кондиционные качества.

Таким образом, рационализация в системах должна выполняться на основании технико-экономического анализа при обязательном условии, что вода получится высокого качества. При рационализации следует обращать внимание на полное использование пропускной способности водоводов, мощностей и подачи электронасосов при режиме работы с хорошим КПД. При рационализации в системах ИВПВ необходимо следить за улучшением качества воды, предусматривая систематические ее анализы.

Повышение КПД отдельных элементов и всей системы ИВПВ в целом является важной задачей снижения себестоимости воды и капиталовложений.

В системах ИВПВ часто приходится применять насосное оборудование для подачи воды из источника восполнения, а также откачивать воду из водозаборов. Необходимо стремиться к минимуму такого подъема воды. Следует максимально использовать природные условия для схемы самотечной системы ИВПВ. По имеющимся данным, подъем воды внутри системы ИВПВ увеличивает ее себестоимость на 25—75% по сравнению с самотечной системой. В долине р. Арагви себестоимость воды из самотечной системы ИВПВ I типа с предварительным улучшением качества воды отстаиванием и последующим хлорированием составляет 0,7 коп. за 1 м³, при средней себестоимости воды 2 коп. в рационально работающих системах I типа ИВПВ с подачей воды из рек и озер насосами и откачкой ее из водозаборов погружными насосами. Несколько меньше 2 коп. за 1 м³ стоит вода при подъеме воды из водозаборов со скважинами сифоном. Удешевить себестоимость воды можно при равномерной подаче воды из системы ИВПВ с полным использованием ее расхода, устройством необходимых регулирующих емкостей (резервуаров), организацией планово-предупредительного ремонта в периоды высоких уровней в реках (при питании из них водозаборов), а также в сезоны снижения потребности в воде.

Рассмотрим некоторые конкретные пути рационализации систем ИВПВ.

3. РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ИВПВ ПРИ ИЗЫСКАНИЯХ И ПРОЕКТИРОВАНИИ

Тип и схема ИВПВ, а также ее элементы с деталями выбирают в зависимости от природных и санитарных условий, их изменений при эксплуатации и возможных технических решений. Поэтому необходимо вести целенаправленно исследования природных условий с одновременным

анализом возможных вариантов технических решений источников водоснабжения, включая ИВПВ. Следовательно, уже на ранних стадиях изысканий следует предусматривать более широкие исследования, результаты которых необходимо анализировать вместе с проектировщиками, чтобы выявлять рациональные варианты источников водоснабжения, в частности ИВПВ. Более подробно связь изысканий с проектированием и роль последнего в направлении изысканий и, в частности, по стадиям изложены в главе IV, п. 2. На самых ранних стадиях изысканий и проектирования следует делать анализ возможных проектных решений систем ИВПВ сначала схематичных, а в конце периода на уровне ТЭД.

На стадии прогнозирования изысканий в процессе предварительной разведки выясняется, в частности, возможность использования аналогов для оценки эксплуатационных запасов подземных вод и составления ТЭД, т. е. сокращения объема изысканий, их сроков выполнения и снижения стоимости, а также более простое, но обоснованное решение ТЭД. Такой метод принимается по комплексному анализу изысканий и проектных решений.

4. ПОВЫШЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КПД В СИСТЕМАХ ИВПВ

Одним из важных показателей рациональной системы ИВПВ I и II типов является гидродинамический КПД инфильтрационных сооружений $\eta_{\text{и}}$, который представляет собой отношение расхода, получаемого водозаборами подземных вод за счет поступления из инфильтрационных сооружений, к расходу, подаваемому на эти сооружения. В большинстве систем ИВПВ этот коэффициент не выше 0,5 и редко больше, например около 0,85 в системе ИВПВ долины р. Арагви. Насколько существенно увеличивается коэффициент $\eta_{\text{и}}$ покажем на следующих расчетах. В системе ИВПВ I типа полная высота подъема воды на инфильтрационные бассейны составляет в среднем 15 м. При таких условиях себестоимость подачи воды к водозаборам с амортизацией и накладными расходами при $\eta_{\text{и}}=0,5$ составит около 1 коп. за 1 м³. Тогда на каждый 1% на 1 м³ воды получим в среднем себестоимость около 0,02 коп. Если же принять расход системы ИВПВ 100 тыс. м³/сут и улучшение коэффициента $\eta_{\text{и}}$ с 0,5 до 0,6, т. е. на 10%, то удешевление составит около 73 000 руб. в год.

Если же в системе ИВПВ производится предварительное улучшение качества воды, например, для II типа ИВПВ, то повышение $\eta_{\text{и}}$ еще более важно. Принимая стоимость полного предварительного улучшения качества поверхностных вод для II типа ИВПВ около 1—2 коп. за 1 м³ воды удешевление по сравнению с вышеописанным примером можно получить на каждый процент снижения коэффициента примерно в 2—4 раза больше. Коэффициент $\eta_{\text{и}}$ определяется по формуле (62) и др. Для оценки эффективности ИВПВ пользуются также коэффициентом эффективности $\eta_{\text{э}}$, который представляет отношение расхода воды, получаемой водозабором за счет инфильтрационных сооружений ΔQ , ко всему расходу водозабора подземных вод $Q_{\text{в}}$. Этот коэффициент определяется по формулам (64) и (65).

Следует иметь в виду, что в связи с поступлением инфильтрационной воды из бассейнов, скважин, каналов, а также с изменением положения динамического уровня у скважин и сопротивлений при входе в скважины доля расхода водозабора за счет других источников поступления воды кроме инфильтрационных сооружений будет изменяться. Кроме того, необходимо иметь в виду изменчивость поступления воды из инфильтрационных сооружений, а также изменения уровней подземных и поверхностных вод.

Теоретические расчеты коэффициентов $\eta_{\text{и}}$ и $\eta_{\text{э}}$ более надежны для простых условий. Более строгую формулу (58) можно представить в виде:

$$\eta_{\text{и}} = \frac{\Delta Q \pm \Sigma Q_{\text{доп}}}{Q_{\text{б}}}, \quad (120)$$

где $\Sigma Q_{\text{доп}}$ — дополнительные изменения притока воды в водозабор в связи с работой инфильтрационных сооружений.

При неравномерных расходах инфильтрационных сооружений и водозабора коэффициент $\eta_{\text{и}}$, как правило, ухудшается и себестоимость воды увеличивается. При эксплуатации для определения коэффициентов $\eta_{\text{и}}$ и $\eta_{\text{э}}$ можно и целесообразно пользоваться фактическими расходами, подаваемыми в инфильтрационные сооружения, расходом, получаемым водозабором, и утечками воды, которые можно рассчитать по карте гидроизогипс, построенной по данным наблюдений за режимом подземных вод. В этом случае расчет коэффициентов $\eta_{\text{и}}$ и $\eta_{\text{э}}$ делается по формулам (120) и (64). Улучшение этих коэффициентов можно получать для различных условий различными способами. Например, для одной системы ИВПВ улучшение КПД $\eta_{\text{и}}$ до 0,7 получено в результате устройства дополнитель-

ного водозабора на основе анализа соотношений дебитов по формуле (58). Величины расхода водозаборов и инфильтрационных бассейнов, а также утечки в сторону получены на основании данных наблюдений за режимом подземных вод и работой сооружений. При рационализации указанной системы ИВПВ были использованы дополнительные мощности насосной станции и пропускная способность длинного водовода до города.

5. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ

Качество поверхностных вод следует анализировать, начиная с источника ИВПВ, во всех его сооружениях, включая и водоносный горизонт. Рассмотрим условия и возможности улучшения качества воды в системах ИВПВ на различных этапах.

Как отмечалось, почти везде в качестве источника ИВПВ принимаются поверхностные воды. В реках, озерах в зависимости от глубины, расстояния от берега и для различных участков качество воды, поступающей в водозабор отличается по мутности, по количеству планктона и другим показателям. Эти данные выявляются по гидрологическим материалам, теоретическим расчетам, а главное — по натурным стационарным наблюдениям. Поэтому выбор участка и глубины, с которых будут поступать поверхностные воды в водоприемник, является важной задачей при изысканиях и проектировании.

Реконструкция водозабора из поверхностных вод может осуществляться при эксплуатации систем ИВПВ (улучшаться качество воды). Возможно также проведение дополнительных охранных санитарных мероприятий для улучшения качества исходных поверхностных вод.

Качество воды в инфильтрационном бассейне улучшается как в самом бассейне, так и при фильтрации через пленку и заcolmатированный слой песка. Время пребывания воды в бассейне продолжается от нескольких часов до нескольких суток. В воде инфильтрационного бассейна планктон развивается в аэробных условиях. При наличии автотрофных микроорганизмов на свету (бассейны открытые) увеличивается концентрация кислорода. В результате жизнедеятельности организмов и увеличения кислорода происходит энергичное окисление органики в воде. Но в то же время под влиянием жизнедеятельности организмов синтезируется органика с поглощением различных веществ. Часть вредных растворенных веществ поглощается планктоном, который в значительной степени оседает на дно.

При фильтрации через пленку задерживаются взвешенные вещества, в значительной степени микроорганизмы и некоторые вредные вещества, растворенные в воде. Качество воды в бассейне изменяется также с увеличением глубины: летом вода меньше прогревается, а зимой меньше охлаждается. Глубина воды в бассейне влияет и на развитие планктона, так как меняется освещенность, температура и мутность воды. Скорости фильтрации в бассейнах различные — 0,5—3 м/сут, что влияет на степень очистки воды. Регулируя развитие планктона, образование и равномерность распределения пленки, глубину бассейна и скорости фильтрации в нем, можно получить воду лучшего качества.

В системе ИВПВ в г. Цвиккау (ГДР) по данным В. М. Берданова после инфильтрации в песчаном бассейне в воде уменьшилась окисляемость (KMnO_4) с 32,8 до 5,4 мг/л, NH_4 с 1,8 до 0, NO_2 — с 0,06 мг/л до 0. В травяных бассейнах изменения в воде были следующие: окисляемости KMnO_4 с 17,3 до 4,6 мг/л; NH_4 с 0,14 до 0,17 мг/л; NO_2 с 0,04 мг/л до следов. В первом случае улучшение качества воды по приведенным показателям получается отличное и во втором случае удовлетворительное. Судя по данным (приведенным В. М. Бердановым и др.) инфильтрационная вода из бассейнов собирается дренажными трубами, уложенными на глубину 2 м под днищем бассейнов. При этом скорости фильтрации в песчаных бассейнах (с пленкой) до 1 м/сут, а в травяных бассейнах летом до 3—4 и зимой до 1—2 м/сут. Разница в качестве воды получается, по-видимому, за счет больших фильтрационных свойств дна травяных бассейнов, а также из-за свойств фильтрующего материала. Недостаточное окисление аммиака при фильтрации через травяные бассейны получалось по всем признакам из-за недостаточного количества кислорода, а также развития организмов при благоприятных условиях в почвенном слое и травяном покрове. В результате интенсивно выделялись продукты метаболизма и разлагались отмирающие организмы. Улучшение качества воды при фильтрации через травяные покровы требует дальнейших исследований. В примере системы ИВПВ в г. Цвиккау, кстати, не было зоны аэрации, важного элемента для улучшения качества воды.

Непосредственно под бассейном может находиться зона аэрации или уровень грунтовых вод. В первом случае по некоторым данным происходит более энергичное окисление органики и задерживание микроорганизмов. Поэтому целесообразно, чтобы бассейны работали без подпора, а под ними был бы слой зоны аэрации хотя бы на 2—3 м.

В водоносном горизонте улучшение качества воды происходит по разным показателям:

температуре инфильтрационной поверхностной воды в водоносном слое, которая может выравниваться, что в основном будет зависеть от температуры поверхностной воды и водоносного горизонта, расстояния и времени пребывания инфильтрационной воды, а также от других условий. Это следует учитывать при проектировании систем ИВПВ и, в частности, по аналогам.

Санитарно-бактериологические показатели. Практика в СССР и за рубежом показывает, что в большинстве случаев при фильтрации в водоносном горизонте количество микроорганизмов в воде быстро уменьшается за счет отмирания и адгезии; в результате обычно из водозаборов вода получается с положительными санитарными показателями числа колоний бактерий (при посеве в среде МПА) и коли-индекса. Однако встречаются случаи, когда вода по этим показателям получается ниже, чем по ГОСТ 2874—73. В этих случаях производят последующее улучшение качества воды, обычно хлорированием, а также принимаются меры к более интенсивному улучшению воды до поступления в водоносный горизонт.

Химические показатели. Химический состав исходной воды в водоносном горизонте меняется мало и в основном за счет смешивания с естественной подземной водой.

Большое влияние на качество воды в водоносном горизонте оказывают токсичные общесанитарные и органолептические растворенные вещества в исходной воде. Водоносные горизонты обычно обладают ограниченными сорбционными возможностями и лишь некоторые компоненты могут переходить в нерастворимые соединения и задерживаться в водоносном горизонте, например свинец при его переходе в осадок и то при небольших превышениях по концентрации в исходной воде сравнительно с ПДК.

Водоносный горизонт при кратковременных загрязнениях и при невысоких концентрациях вредных веществ сравнительно с ПДК является барьером, т. е. при определенных условиях происходит как бы растекание — снижение концентрации вредных веществ, и в водозабор вода поступает с концентрацией загрязнителя ниже ПДК. Расчеты барьерной роли производят по теории массопереноса.

Когда инфильтрационные бассейны и водоносный горизонт не справляются с улучшением качества воды до требований ГОСТ 2874—73 с учетом хлорирования, то производят предварительную водоподготовку, и, если требуется, последующее улучшение качества воды. Радикальными для

получения исходных поверхностных вод в соответствии с требованиями к источникам хозяйственно-питьевого водоснабжения (ГОСТ 1.3.03—77) являются санитарные охраняемые мероприятия.

6. СОХРАНЕНИЕ И УВЕЛИЧЕНИЕ РАСХОДА ВОДОЗАБОРНЫХ И ПОГЛОЩАЮЩИХ СКВАЖИН

Водозаборные и поглощающие скважины в результате нерациональных способов бурения, в связи с невысокими фильтрационными свойствами водоносных пород, а также нерациональным оборудованием водоприемной их части могут давать небольшие дебиты. Рациональные способы вскрытия водоносных пород и способы оборудования их фильтрами описаны в специальных руководствах. Также описаны и способы увеличения расхода скважин в водоносных породах с невысокими фильтрационными свойствами, в частности, путем взрывов, проходкой большим диаметром с засыпкой обратным фильтром в мелкозернистых водоносных горизонтах.

Одним из видов рационализации водозаборных и поглощающих скважин при уменьшении со временем их расхода является соответственно восстановление их расхода и приемистости, что выполняется различными способами в зависимости от причин, вызвавших уменьшение расхода и приемистости.

Часть этих способов описана в главе VIII, а другие способы описаны в специальных книгах.

7. УЛУЧШЕНИЕ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПИТАНИЯ СИСТЕМ ИВПВ ИЗ РЕК

Значительная часть систем ИВПВ получает подпитывание не только из специальных сооружений, но при инфильтрации непосредственно и из рек. При этом русла рек часто заиливаются, сопротивления при инфильтрации воды увеличиваются и величина такого питания подземных вод сокращается.

Для восстановления фильтрационных свойств следует верхнюю заиленную часть русла реки удалять или рыхлить, учитывая, что кольматирующий мелкозем уносится водой при течении реки.

**Схема последовательности изысканий эксплуатационных запасов подземных вод
и их взаимосвязь с проектированием систем ИВПВ**

Наименование	Стадии изысканий				стационарные наблюдения при эксплуатации
	прогнозная	поисковая	предварительная разведка	детальная разведка	
1	2	3	4	5	6
1. Гидрогеологические исследования: изученность (основные категории) задачи	C_2 Ориентировочное выявление возможностей удовлетворения потребности в воде с учетом искусственного восполнения подземных вод	$C_2 + C_1$ Уточнение возможностей удовлетворения потребности в воде с учетом искусственного восполнения подземных вод. Обоснование и предварительный выбор участков для искусственного восполнения. Проведения разведочных работ	$C_1 + V$ Предварительная оценка эксплуатационных запасов подземных вод с их восполнением. Схема для проведения детальной разведки с выбором участков.	$C_1 + B + A$ Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с их восполнением для утверждения. Обоснование для проектирования и эксплуатации искусственного восполнения с окончательной аргументированной ее схемой	$B + A$ Уточнение эксплуатационных запасов с их восполнением и возможностью увеличения эксплуатации. Уточнения текущего планирования эксплуатации
способы исследований и их анализ	Сбор, систематизация, анализ и обобщение имеющихся материалов по подземным водам, санитарным условиям и гидрологии в районе объекта, а также изучение аналогов по искусственному восполнению подземных вод	Бурение и опробование поисковых скважин на намечаемых участках. Изучение режима поверхностных и подземных вод. Лабораторные исследования пород и вод для искусственного восполнения на выбранных участках.	Бурение и опробование разведочных и опытных скважин. Изучение режима подземных вод. Детальные исследования пород и воды для искусственного восполнения на выбранных участках. Лабораторные опыты по	Бурение и опробование опытно-разведочных и опытно-эксплуатационных скважин на выбранных участках. Детальный анализ всего материала. Продолжение наблюдений за режимом подземных вод. Опытные работы в натуре по	Наблюдения за режимом подземных вод, сооружением при искусственном восполнении, водозаборами сооружениями; систематизация и анализ. В случае необходимости бурение разведочно - эксплуатационных скважин и их

выделение участков искусственного пополнения подземных вод	Ориентировочное выделение	Приближенный теоретический анализ искусственного восполнения на предварительно выбранных участках. Анализ всего материала с учетом данных прогнозной стадии. Организация наблюдений за режимом подземных вод	искусственному восполнению подземных вод. Предварительные расчеты искусственного восполнения	кусственному восполнению подземных вод. Расчеты искусственного восполнения подземных вод	опробование, опытные исследования на эксплуатационных сооружениях при искусственном восполнении подземных вод с их анализом. Расчеты для увеличения искусственного восполнения подземных вод
II. Сопровождающие гидрогеологические исследования	Сбор материалов и их обобщение	Обследование с выбором вариантов участков для ИВПВ. Организация стационарных наблюдений. Предварительный гидрогеологический анализ	Стационарные наблюдения. Выбор участка и места водозабора из поверхностных вод. Уточнение гидрогеологического анализа	Подтверждение выбора участка	Возможное расширение участка (участков) и обоснование изменения параметров эксплуатации
III. Исследования для обоснования зоны санитарной охраны	Сбор материалов	Обследование с выводами	Исследования для проектирования зон санитарной охраны и выводов. Предварительный проект зоны санитарной охраны	Дополнительные исследования для уточнения проекта зон санитарной охраны. Проект зоны санитарной охраны	Исследования для уточнения зон санитарной охраны
IV. Предпроектные и проектные работы	Основание для направления поисков и разведки. Соображения о возможных источниках водоснабжения с ориентировочной их оценкой	Реконструкция с выводами о целесообразности разведки для проектирования ИВПВ. Обоснование для предварительного баланса поверхностных и подземных вод с учетом систем ИВПВ и для районной планировки	Обоснование для составления ГЭД. Уточнение возможности использования систем ИВПВ при составлении баланса поверхностных и подземных вод	Составление проекта	Составление проекта в одну стадию

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Полный анализ воды

Полный анализ воды делается в соответствии с требованиями ГОСТ 2874—73.

По табл. 1 рассчитывают общее количество бактерий в неразбавленной воде в 1 мл и коли-индекс.

По табл. 3 определяют: запах при 20°C и подогревании воды до 60°C, баллы; привкус при 20°C, баллы; цветность по платино-кобальтовой шкале или имитирующей ее, град; мутность по стандартной шкале, мг/л.

По табл. 4 рассчитывают, мг/л: сухой остаток, хлориды (Cl^-), сульфаты (SO_4^{2-}), железо (Fe^{2+} и Fe^{3+}), марганец (Mn^{2+}), медь (Cu^{2+}), цинк (Zn^{2+}), остаточный алюминий (Al^{3+}), гексаметаминфосфат (PO_4), триполифосфат (PO_4), а также общую жесткость, мг-экв/л.

При изысканиях и при эксплуатации полностью определяются по табл. 2 ГОСТа следующие компоненты: бериллий, молибден, мышьяк, нитраты (по N), полиакриламид, свинец, селен, стронций, фтор, уран (U) природный и уран 238, радий — 226 (Rd), стронций — 90 (Sr) и другие вредные компоненты согласно указаниям Минздрава СССР («Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде водоемов санитарно-бытового использования и требования к составу и свойствам воды водоемов и пунктов питьевого и культурно-бытового использования», М., 1973, стр. 14).

Для полного анализа воды определяют: температуру, pH, eH; рассчитывают, мг/л: HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+} , Fe^{3+} , CO_2 (свободная), растворенный и свободный кислород (O_2), а также, мг-экв/л: карбонатную жесткость, сульфатную жесткость.

Кроме того, определяется окисляемость (перманганатная), а в начале исследований и бихроматная; микрофлора и микрофауна (желательно); органические вещества (весьма желательно) по методике [15].

При исследовании микрофлоры и микрофауны в подземных водах при полных анализах воды следует определять также содержание бора, фосфора и других биологически важных микрокомпонентов.

Изучение органических веществ в воде можно вести по работам [15, 37], а общих гидрохимических процессов — по работе [38].

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Сокращенный анализ воды

При сокращенном анализе воды определяют: температура, °C; запах при +20°C и подогревание воды до +60°C в баллах; привкус при +20°C, в баллах; цветность в градусах, мг/л: мутность, минерализация, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{K}+\text{Na}$ (по разности), железо (Fe^{2+} и Fe^{3+}), азотистая кислота (NO_2), азотная кислота (NO_3), аммиак (NH_4), свободный кислород O_2 , окисляемость (перманганатная), O_2 , CO_2 — свободная; а также, мг-экв/л: общая жесткость, карбонатная жесткость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. С., Гребенников В. Г., Астрова Н. В. Гидрогеологическое обоснование методов восстановления производительности скважин на воду. М., ВНИИ ВОДГЕО, 1979, с. 91.
2. Алексеев В. С., Коммунар Г. М. Расчет водозаборных скважин с учетом работы водоподъемного оборудования. — Науч. тр. / ВНИИ ВОДГЕО, 1977, вып. 63, с. 59—66.
3. Арцев А. И., Бочеввер Ф. М., Лапшин Н. Н. и др. Проектирование водозаборов подземных вод. Под ред. Ф. М. Бочеввера. — М., Стройиздат, 1976, с. 292.
4. Берданов В. М. и др. Искусственное пополнение подземных вод в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения. — М., Стройиздат, 1978, с. 260.
5. Берданов В. М., Перлина А. М., Порядин А. Ф. Искусственное пополнение подземных вод (Обзор исследований опыта применения метода в ГДР). — Обзор информ. / ЦБНТИ Минжилкомхоза РСФСР, сер. Водоснабжение и канализация, вып. 1(14). М., 1979, с. 3—49.
6. Боголюбов К. С., Бурчак Т. В. Определение грязеемкости инфильтрационных бассейнов. — Экспресс-инф. / ОНТИ ВИЭМС, серия VIII, Гидрогеология и инженерная геология, вып. 2, М., 1976.
7. Боголюбов К. С., Бурчак Т. В. Свойства илстой пленки в инфильтрационных сооружениях открытого типа. — Науч. тр. / ВНИИ ВОДГЕО, сер. Гидрогеология, вып. 52, М., 1976, с. 241.
8. Боголюбов К. С., Кузьмина А. С. Использование концевых диафрагм на инфильтрационных бассейнах систем искусственного пополнения. Научные исследования в области инженерной гидрогеологии. — Науч. тр. / ВНИИ ВОДГЕО, вып. 74, М., 1978, с. 213.
9. Бочеввер Ф. М., Лапшин Н. Н., Орадовская А. Е. Защита подземных вод от загрязнений. — М., Недра, 1979, с. 254.
10. Бурчак Т. В. Инфильтрационные бассейны. — Киев. Будівельник, 1978, с. 152.
11. Гольдберг В. М. Гидрогеологические прогнозы движения загрязненных подземных вод. — М., Недра, 1976, с. 169.
12. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям пресных вод. Инструкция о содержании, оформлении и порядке представления в государственную комиссию по запасам полезных ископаемых при Совете Министров СССР и территориальные комиссии по запасам ископаемых Министерства геологии СССР материалов по подсчету эксплуатационных запасов пресных подземных вод. — М., Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых при СМ СССР, 1978, с. 114.
13. Искусственное пополнение запасов подземных вод. — М., Знание, 1976, с. 192.
14. Искусственное восполнение подземных вод. — Науч. тр. / ВСЕГИНГЕО, вып. 126, 1979, с. 75.
15. Кирухин В. К., Мелькановичкая С. Г., Швеи В. М. Определение органических веществ в подземных водах. — М., Недра, 1976, с. 189.
16. Методика исследований для обоснования искусственного восполнения запасов подземных вод. Принципы районирования по условиям создания искусственных запасов. — М., изд. СЭВ, 1977, с. 166.
17. Методы оценки ресурсов подземных вод. Международная ассоциация гидрогеологов. Труды. — М., Наука, 1979, с. 348.
18. Плотников Н. А. Биологическое загрязнение пресных подземных вод и их охрана. — Бюл. Моск. о-ва испытателей природы, сер. Геология, т. 5, вып. 2, М., 1980, с. 110—120.
19. Плотников Н. А. Микроорганизмы в пресных подземных водах. — Экспресс-информ. / ВИЭМС, сер. Гидрогеология, вып. 4, 1981, с. 1—10.

20. Плотников Н. А., Сычев К. И. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением. — М., Недра, 1976, с. 151.
21. Плотников Н. И., Плотников Н. А., Сычев К. И. Гидрогеологические основы искусственного восполнения запасов подземных вод. М., Недра, 1978, с. 311.
22. Попкович Г. С. Автоматизация и диспетчеризация систем водоснабжения и канализации. — М., Стройиздат, 1978, с. 188.
23. Порядин А. Ф. Устройство и эксплуатация инфильтрационных водозаборов. — М., Стройиздат, 1977, с. 128.
24. Правила выбора и оценка качества источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. ГОСТ 17.1.3.03—77. — М., Изд. стандартов, 1977, с. 12.
25. Правила технической эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения населенных мест. М., Стройиздат, 1979, т. 117.
26. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. — М., Знание, 1979, с. 158.
27. Рекомендации по проведению режимных наблюдений на участках действующих систем искусственного восполнения подземных вод. — М., ВСЕГИНГЕО, 1978, с. 35.
28. Рекомендации по проектированию и эксплуатации систем искусственного пополнения запасов подземных вод (ИППВ). — М., ВНИИ ВОДГЕО, 1976, с. 223.
29. Рекомендации по проектированию сооружений для искусственного пополнения подземных вод с целью хозяйственно-питьевого водоснабжения. М.: АКХ им. К. Д. Панфилова, 1978, т. 80.
30. Руководство по проектированию сооружений для забора подземных вод. М., Стройиздат, 1978, с. 209.
31. СНиП II-31-74, ч. II, глава 31. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Изд. 2-е перераб. и доп. М., Стройиздат, 1976, с. 145.
32. Справочник проектировщика. Водоснабжение населенных мест и промышленных предприятий. М., Стройиздат, 1977, с. 382.
33. Спрогис Я. Я., Тропс Р. П. Определение фильтрационных параметров слоя осадка инфильтрационных бассейнов. — В кн.: Искусственное пополнение запасов подземных вод. М., МДНТП, 1976, с. 194.
34. Сычев К. И. Основные принципы гидрогеологического обоснования искусственного пополнения подземных вод. — Геология и разведка, 1975, № 8, с. 92—97.
35. Научные исследования в области инженерной гидрогеологии. — Науч. тр. / ВНИИ ВОДГЕО. Вып. 63, 1977, с. 153.
36. Христианова Л. А., Чекалова С. Н. Влияние фитопланктона на качество воды при искусственном инфильтрационном пополнении запасов подземных вод. М., Знание, 1976, с. 178—182.
37. Чекалова С. Н. Баланс биогенного углерода в системе инфильтрационного пополнения подземных вод. — Гигиена и санитария, 1977, № 2, с. 103—114.
38. Янчев В. К., Гудзенко В. В. Гидрохимические и радиоизотопные исследования процессов искусственного регулирования подземных вод. Киев, Ин-т геолог. наук АН УССР, 1979, с. 55.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Общие вопросы систем искусственного восполнения подземных вод (ИВПВ)	5
1. Назначение систем ИВПВ	5
2. Типы систем ИВПВ	7
3. Применение ИВПВ в СССР и за рубежом	9
4. Перспективы применения систем ИВПВ в СССР	13
Глава II. Природные условия применения систем ИВПВ	13
1. Климатические условия	13
2. Гидрогеологические условия	16
3. Гидрологические условия и рельеф	22
Глава III. Схемы систем ИВПВ и их выбор	28
1. Общая характеристика	28
2. Системы I типа (открытого)	29
3. Системы II типа (закрытого)	33
4. Простые системы III типа (открытого)	34
5. Травяные бассейны	36
6. Выбор системы ИВПВ	37
Глава IV. Общие вопросы проектирования систем ИВПВ	38
1. Обоснование проектирования	38
2. Стадии проектирования и их связь с изысканиями	39
3. Общая схема водоснабжения	41
4. Надежность систем ИВПВ	43
5. Технические нормативы, руководства и согласования	44
Глава V. Улучшение качества воды в системах ИВПВ	45
1. Основы улучшения	45
2. Схемы улучшения	51
3. Требования к качеству воды	53
4. Предварительное улучшение качества поверхностной воды	59
5. Улучшение качества воды в инфильтрационных бассейнах и зоне аэрации	65
6. Улучшение качества воды в водоносном горизонте	73
Глава VI. Проектирование и эксплуатация инфильтрационных бассейнов	82
1. Конструкции	82
2. Режим работы	86
3. Определение расхода	88
4. Определение параметров	99
5. Восстановление расхода	103
Глава VII. Гидродинамический расчет водозаборов в системе ИВПВ I типа	105
1. Общие положения	105
2. Определение понижений уровня воды и расхода водозабора	106
3. Определение гидродинамического КПД инфильтрационных сооружений	108
4. Определение гидродинамического КПД системы ИВПВ	110
Глава VIII. Проектирование систем ИВПВ II типа	110
1. Общие положения	110
2. Схемы систем и конструктивные особенности поглощающих скважин	112

3. Простейшие способы предварительного улучшения качества поверхностных вод	114
4. Борьба с воздухом в воде при закачке ее в водоносный горизонт	117
5. Расчет расхода поглощающих скважин	121
6. Прогноз режима работы поглощающих скважин	123
7. Восстановление расхода скважин	128
Глава IX. Комплексные гидравлические расчеты систем «скважины — водоподъемники — водоводы»	130
1. Общие положения	130
2. Графоаналитический и аналитический методы расчета систем	132
3. Гидравлический расчет систем подачи воды от скважин	138
Глава X. Простые системы ИВПВ III типа (открытого)	146
1. Общие положения	146
2. Задерживание естественного поверхностного стока и увеличение инфильтрации в грунтовые воды	147
3. ИВПВ в нешироких долинах при небольшой мощности водоносного слоя и недостаточном расходе реки в отдельные периоды	148
4. ИВПВ в долинах рек при значительной емкости водоносного слоя и недостаточном расходе реки в отдельные периоды	151
5. Улучшение питания береговых инфильтрационных водозаборов при заиливании русла реки	155
6. ИВПВ с использованием естественных понижений в рельефе и стариц в долинах рек	156
7. Попутное ИВПВ при устройстве гидротехнических сооружений	159
8. Расчет емкостных запасов подземных вод в конусе выноса в естественных условиях и использование их при разных эксплуатационных расходах с восполнением	160
Глава XI. ИВПВ с инфильтрацией через луговые площади и травяные бассейны	163
Глава XII. Проектирование технического оборудования водозаборов	167
1. Общие положения	167
2. Водозаборы из скважин	168
3. Горизонтальные водозаборы	180
4. Лучевые водозаборы	183
Глава XIII. Проектирование систем ИВПВ в особых условиях	184
1. Районы многолетней мерзлоты	184
2. Аридные районы	186
3. Районы высокой сейсмичности	189
4. Приморские районы	190
Глава XIV. Санитарная охрана систем ИВПВ	190
1. Задачи	190
2. Пояса (зоны) санитарной охраны	191
3. Проектирование зон санитарной охраны	192
4. Санитарные наблюдения при эксплуатации ИВПВ	193
Глава XV. Изучение эксплуатации систем ИВПВ	194
1. Задачи и состав наблюдений	194
2. Автоматизация наблюдений и управления в системах ИВПВ	196

3. Наблюдения за источником ИВПВ и водозабором из него	198
4. Наблюдения за инфильтрационными сооружениями	198
5. Наблюдения за водозабором подземных вод	200
6. Наблюдения за режимом уровней подземных вод в системе ИВПВ	202
Глава XVI. Экономический анализ систем ИВПВ	203
Глава XVII. Рационализация в системах ИВПВ	213
1. Общие положения	213
2. Общие теоретические и методические основы рационализации	214
3. Рационализация ИВПВ при изысканиях и проектировании	215
4. Повышение гидродинамического КПД в системах ИВПВ	216
5. Улучшение качества воды	218
6. Сохранение и увеличение расхода водозаборных и поглощающих скважин	221
7. Улучшение непосредственного питания систем ИВПВ из рек	221
Приложение I. Схема последовательности изысканий эксплуатационных запасов подземных вод и их взаимосвязь с проектированием систем ИВПВ	224
Приложение II. Полный анализ воды	226
Приложение III. Сокращенный анализ воды	226
Список литературы	227