



Н. И. ПЛОТНИКОВ
Н. А. ПЛОТНИКОВ
К. И. СЫЧЕВ

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ИСКУССТВЕННОГО
ВОСПОЛНЕНИЯ
ЗАПАСОВ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД

551.49:553.6

Н. И. ПЛОТНИКОВ
Н. А. ПЛОТНИКОВ
К. И. СЫЧЕВ

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ИСКУССТВЕННОГО
ВОСПОЛНЕНИЯ
ЗАПАСОВ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД

2538



МОСКВА «НЕДРА» 1978

Плотников Н. И., Плотников Н. А., Сычев К. И. Гидрогеологические основы искусственного восполнения запасов подземных вод. М., «Недра», 1978, 311 с.

Проблемой искусственного восполнения запасов подземных вод в настоящее время занимаются многие страны мира, в том числе и СССР. Интерес к ней вызван повышенными требованиями использования подземных вод для целей водоснабжения. В настоящее время за счет инфильтрации поверхностных вод в подземные емкости искусственные запасы подземных вод в различных странах мира составляют от 15 до 30% от общего количества, потребляемого для водоснабжения. На территории СССР процент использования искусственно созданных подземных вод пока еще незначителен, за исключением районов Прибалтийских республик и отдельных районов РСФСР. Несмотря на важность рассматриваемой проблемы, в настоящее время отсутствуют методические указания, в которых были бы освещены гидрогеологические основы искусственного восполнения запасов пресных подземных вод. Настоящая работа в этой части восполняет существующий пробел.

Книга рассчитана на гидрогеологов и других специалистов, работающих в области водоснабжения и орошения.

Табл. 25, ил. 76, список лит. — 77 назв.

Проблема искусственного восполнения запасов пресных подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения приобретает в нашей стране общегосударственное значение.

Накопленный в СССР, а также в зарубежных странах опыт показывает, что на базе искусственно созданных запасов пресных подземных вод в природных емкостях горных пород успешно могут быть решены следующие важные инженерно-технические задачи:

а) увеличена общая производительность действующего водозаборного сооружения с целью удовлетворения дополнительной потребности в воде города, промышленного предприятия или объекта орошения;

б) улучшено качество естественных подземных вод, используемых для водоснабжения на действующих водозаборах;

в) созданы благоприятные условия для защиты продуктивного водоносного горизонта на водозаборных сооружениях от истощения и загрязнения ресурсов пресных подземных вод, а также возможного проникновения в них соленых морских вод и подземных вод повышенной минерализации;

г) трансформирован методом магазинирования временный сток поверхностных вод в подземные геологические емкости (создание подземных водохранилищ) с целью искусственного регулирования водопотребления для различных нужд народного хозяйства (как резервный или постоянный источник водоснабжения или орошения).

Таким образом, создание в верхней части разреза гидрогеосферы искусственных запасов пресных подземных вод является надежным средством достижения различной цели в области водоснабжения, орошения или обводнения пастбищ.

По своему содержанию рассматриваемая проблема состоит из трех взаимно связанных частей:

- 1) гидрогеологические основы создания искусственных запасов пресных подземных вод;
- 2) технология создания искусственных запасов;
- 3) технические средства искусственного восполнения.

Это подразделение до некоторой степени является условным. Проектирование всех мероприятий по искусственному восполнению запасов пресных подземных вод в каждом конкретном случае является единым процессом. Однако эта условность позволяет подчеркнуть и выделить по содержанию те ее разделы, для

обоснования которых требуется проведение специальных разведочных гидрогеологических исследований.

В настоящей монографии изложена только первая часть проблемы — гидрогеологические основы, в которой рассмотрены теоретические вопросы и геолого-гидрогеологические условия формирования искусственных запасов пресных подземных вод, методика разведочных гидрогеологических работ, требования к качеству источника искусственного восполнения, а также оценка эксплуатационных запасов с учетом их искусственного восполнения.

Анализ имеющихся материалов позволил впервые разработать примерную типизацию условий формирования искусственных запасов подземных вод и представить краткую характеристику каждой выделенной группы. Применительно к разработанной типизации в отдельных главах монографии рассмотрены методика гидрогеологических исследований, принципы и методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного восполнения. Учитывая важность обеспечения необходимого качества подземных вод, в специальной главе подробно изложены требования к качеству источника восполнения и теоретические основы прогнозной оценки.

При прогнозной оценке производительности различных типов инфильтрационных сооружений большое значение имеет закономерность так называемой пленочной фильтрации жидкости. В главе IX изложены некоторые теоретические основы пленочной фильтрации, существующие методы прогнозной оценки производительности инфильтрационных сооружений; расчет производительности инфильтрационного бассейна для искусственного питания подземных вод, что очень важно для общей оценки их эксплуатационных запасов.

В отдельных разделах рассмотрены вопросы изучения режима подземных вод в процессе эксплуатации, организации зон санитарной охраны, а также охраны подземных вод от загрязнений, при их длительной эксплуатации.

В монографии изложены некоторые примеры из опыта разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного восполнения.

С учетом современных темпов интенсивного развития производительных сил нашей страны, географического расположения новых городов, производственно-промышленных комплексов, объектов орошения и обводнения пастбищ и т. д. проблема искусственного формирования запасов подземных вод приобретает повсеместное значение. Она возникает и может быть решена на объектах, расположенных в аридной, гумидной зонах, зоне умеренного климата, в суровых климатических районах Восточной Сибири, Крайнего Севера и Северо-Востока нашей страны. И во всех этих зонах имеются предпосылки для искусственного восполнения запасов подземных вод.

В связи с этим теряет свое значение какое-либо районирование территории СССР по возможностям применения искусственного восполнения запасов подземных вод. По существу создать искусственные запасы пресных подземных вод практически возможно во всех климатических зонах СССР при наличии источника искусственного восполнения. Для этого, однако, необходимы поиски путей и способов создания искусственных запасов применительно к различным природным условиям.

Положительные результаты, полученные по промышленным и опытным исследованиям, проведенным в районах Крайнего Севера и Северо-Востока, подтверждают этот важный вывод.

Необходимо подчеркнуть еще очень важное положение, подробно рассмотренное в монографии. Гидрогеологические исследования для целей обоснования искусственных запасов подземных вод по своему значению и содержанию необходимо рассматривать как составную часть общего большого научно-производственного комплекса поисково-разведочных гидрогеологических работ, направленных на изучение и выявление естественных и искусственных ресурсов пресных подземных вод для нужд народного хозяйства.

При такой постановке вопроса отдельные разделы гидрогеологических исследований по обоснованию искусственных запасов подземных вод в разумных объемах должны предусматриваться непосредственно во всех проектах поисково-разведочных работ как на новых месторождениях, так и на месторождениях, находящихся в эксплуатации (по программе стадии эксплуатационной разведки).

Опыт использования подземных вод для целей водоснабжения и орошения, накопленный в СССР, показывает, что, как правило, на всех действующих водозаборах всегда возникает необходимость увеличения их производительности в связи с ростом общего водопотребления объекта. Дополнительное увеличение общей производительности действующего водозабора не всегда удается решить за счет естественных ресурсов.

Результаты исследований по обоснованию искусственных запасов пресных подземных вод всегда могут служить надежным резервом покрытия возросшего потребления в воде либо для водоснабжения, либо для орошения или обводнения пастбищ. В связи с этим в монографии неоднократно подчеркивается, что искусственное восполнение эксплуатационных запасов пресных подземных вод следует рассматривать:

а) как надежный способ повышения эффективности поисково-разведочных гидрогеологических работ, позволяющий при незначительных дополнительных затратах обеспечить прирост эксплуатационных запасов подземных вод на новом месторождении или на действующем водозаборе;

б) как реальный путь удовлетворения дополнительной потребности в воде в различных климатических зонах СССР.

Настоящая монография составлена: Н. И. Плотниковым — предисловие, главы I, II, III, VI, VII; Н. И. Плотниковым совместно с К. И. Сычевым — главы V, VIII и XI; К. И. Сычевым — глава IX; Н. И. Плотниковым совместно с Э. Н. Плотниковой — глава XII. Н. А. Плотников является автором глав IV, X и XV; раздел 10 главы IV составлен К. И. Сычевым; главы XIII и XIV написаны А. Э. Венским, Э. А. Грикевичем, Я. Б. Толстым, П. П. Дилюнасом и Э. А. Ягминасом при участии Н. И. Плотникова.

Общее научное редактирование монографии осуществлено Н. И. Плотниковым.

Теоретические основы искусственного восполнения запасов подземных вод, а также методика проведения гидрогеологических работ в этом направлении в настоящее время разработаны еще недостаточно. Небольшой опыт у нас в стране накоплен и в области практического осуществления проектов искусственного восполнения эксплуатационных запасов. Поэтому авторы отчетливо представляют, что не все разделы новой гидрогеологической проблемы равноценно освещены в монографии.

Авторы заранее приносят благодарность всем, кто сочтет своей обязанностью направить в издательство «Недра» свои замечания и рекомендации по дальнейшему ее улучшению.

СОДЕРЖАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАПАСОВ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ИЗ ИСТОРИИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В зарубежной литературе нет фундаментальных монографий, посвященных истории возникновения общей проблемы формирования искусственных запасов пресных подземных вод.

По истории развития работ в области создания искусственных запасов подземных вод в отечественной литературе опубликован ряд работ: В. М. Григорьева (1964), В. С. Усенко (1971, 1972), Боголюбова (1974 г.) и др.

В опубликованных работах приводятся интересные данные из практики зарубежных стран и Советского Союза по истории возникновения общей идеи искусственного воспроизводства запасов пресных подземных вод, а также описания конкретных примеров создания искусственных запасов, что очень важно для обобщения опыта разработки методики разведочных гидрогеологических работ и рациональной оценки эксплуатации инженерных сооружений.

Систематизация материалов советских специалистов выполнена по различным разрозненным источникам зарубежной и отечественной литературы.

По имеющимся не вполне полным данным искусственное восполнение подземных вод впервые было выполнено более полутора века назад в Шотландии. В долине р. Клайд был заложен водозабор с целью подачи воды для водоснабжения г. Глазго. Однако береговая инфильтрация полностью не обеспечивала необходимую производительность водозабора. В связи с этим, а также в связи с увеличением потребности города было принято решение построить на участке действующего водозабора инфильтрационную галерею. Последняя периодически затопливалась речными водами и таким образом производилось дополнительное искусственное питание водозаборных скважин.

Несколько позже на юге Франции в долине р. Гаронны было осуществлено простейшее мероприятие для водоснабжения г. Тулузы. С помощью небольших плотин было выполнено береговое затопление участка влияния водозаборного сооружения.

В связи с острым недостатком в воде особенно интенсивно стали развиваться различные методы искусственного создания

запасов пресных подземных вод в Германии; активным деятелем был известный ученый Тим и его ученик Рихерт.

Необходимо подчеркнуть, что уже с первого периода зарождения ковой проблемы водозаборы инфильтрационного типа, расположенные вблизи водоемов или водотоков, рассматривались как технические средства искусственного получения эксплуатационных запасов подземных вод, создаваемых в рыхлых аллювиальных образованиях за счет береговой инфильтрации поверхностных вод.

Однако вскоре на участках длительной эксплуатации некоторых инфильтрационных водозаборов было отмечено снижение их производительности, как потом выяснилось, за счет интенсивной кольматации и заиления фильтрующего слоя русловых отложений рек; кольматация наиболее быстро происходила на реках, имеющих повышенный твердый сток в период прохождения весенних паводковых расходов.

Кольматация и заиление приводили к увеличению гидравлического сопротивления русловых отложений и, следовательно, к снижению общего дебита эксплуатационных скважин. Особенно резкое снижение дебита скважин отмечалось в водозаборах, где была принята сифонная система эксплуатации, так как в этой схеме водозабора, как известно, ограниченная величина понижения уровня. Это обстоятельство побудило к зарождению мероприятий по дополнительному искусственному питанию инфильтрационных водозаборов путем устройства на поверхности вблизи каптажных сооружений специальных инфильтрационных бассейнов или траншей, борозд или лиманного периодического затопления площади, огражденной примитивной дамбой.

Опыт показал, что эти мероприятия позволяют не только восстановить дебит инфильтрационного водозабора, но и значительно увеличить его общую производительность.

В конце прошлого века и в начале XX в. искусственное восполнение запасов пресных подземных вод стало довольно широко применяться в Соединенных Штатах Америки.

В больших масштабах здесь были выполнены работы по magazинированию поверхностных речных вод в песчано-галечниковые аллювиальные образования, а также конусов выноса в связи с истощением запасов подземных вод, используемых для орошения. Такие работы вначале были выполнены на площади конуса выноса р. Саут-Платт в штате Колорадо, а затем в штате Калифорния на реках Санта-Яго (на площади конуса выноса), Санта-Ана, Санта-Клара и др. (на площади развития террасовых отложений).

С этой целью в долинах рек производилось бурение системы поглощающих скважин и строительство инфильтрующих траншей, осуществлялось искусственное регулирование паводковых расходов рек, затопление паводковыми водами больших площадей речных долин, устройство систем мелких водохранилищ и др.

Однако первые работы по магазинированию указали на необходимость предварительной подготовки поверхностных вод, главным образом с целью удаления твердого стока и вообще мутности воды. Особенно широко стали внедряться в практику различные способы искусственного обогащения пресных подземных вод в западных штатах США, где особенно интенсивно появилась тенденция к значительному истощению естественных запасов почти всех продуктивных водоносных горизонтов (в штатах Техас, Нью-Мексико, Аризона, Юта, Невада и др.).

В связи с этим в различных университетах США были проведены в большом объеме специальные научно-исследовательские работы по теоретическому обоснованию искусственного восполнения запасов подземных вод. Исследования проводились преимущественно по совершенствованию технологического процесса — предварительная очистка воды, способы очистки, выбор рациональных конструкций отдельных сооружений и технических средств. Во всех заинтересованных штатах были проведены в большом объеме комплексные гидрогеологические, гидрологические исследования и инженерные изыскания.

В настоящее время методы искусственного восполнения подземных вод в США внедряются в больших масштабах, искусственно созданные запасы составляют примерно 30% от общего современного водопотребления.

Опыт работ США, многих стран запада подтвердил необходимость предварительной очистки и подготовки поверхностных вод, используемых для создания искусственных запасов подземных вод. Особенно тщательная подготовка требуется при использовании нагнетательных скважин.

Вместе с тем опыт показал, что в общей программе искусственного формирования подземных вод в верхней части земной коры важную роль играет также оптимальная конструкция инженерных сооружений инфильтрационных и нагнетательных, которая должна разрабатываться в каждом конкретном случае с учетом особенностей гидрогеологических, гидрологических и санитарно-технических условий, в том числе конструкция различных фильтров инженерных сооружений.

В России работы по искусственному восполнению запасов подземных вод были начаты в конце прошлого века Ф. И. Владимирским вблизи г. Арзамаса в связи с разрешением проблемы водоснабжения города. Инженерные мероприятия здесь были направлены на искусственное увеличение производительности действующего водозабора. С этой целью дополнительное восполнение запасов подземных вод производилось путем аккумуляции местного поверхностного стока в сборные инфильтрационные бассейны, а также в мелкие пруды, построенные гипсометрически выше водозабора. Дополнительное искусственное питание подземных вод позволило в данном случае увеличить производительность водозабора почти в три раза.

Удачные опыты по искусственному питанию действующего водозабора были проведены также в долине р. Быстрица для водоснабжения г. Ивано-Франковска.

Наиболее интенсивно работы по созданию искусственных запасов подземных вод стали развиваться в нашей стране после Великой Октябрьской социалистической революции, особенно в период первых пятилеток — в период индустриализации страны.

История развития работ по искусственному восполнению запасов подземных вод в СССР достаточно подробно изложена в ряде опубликованных работ (И. С. Глазунов, Ю. И. Рябчук и др. 1966 г., В. С. Усенко — 1972 г.), поэтому отметим лишь основные положения, которые оказали свое влияние на разработку и дальнейшее развитие самой проблемы.

Подводя итоги, можно отметить, что комплекс работ по искусственному воспроизводству запасов подземных вод развивался в нашей стране по следующим основным направлениям.

Наиболее широкое развитие получило строительство береговых инфильтрационных водозаборов в непосредственной близости водотоков и водоемов; с помощью эксплуатации скважин на водозаборном участке создавались условия для искусственного восполнения запасов грунтовых вод в аллювиальных отложениях за счет береговой инфильтрации поверхностных вод. На водозаборном участке создавалась так называемая «наведенная инфильтрация». В этом направлении применялись несколько конструкций водозаборных сооружений: а) система взаимодействующих вертикальных буровых скважин; б) система горизонтальных и взаимодействующих водосборных галерей; в) лучевые инфильтрационные водозаборы.

В Средней Азии береговые инфильтрационные водозаборы (система взаимодействующих буровых скважин) впервые были построены в долинах рек Зеравшан и Чирчик с целью водоснабжения городов Самарканда и Ташкента.

В Сибири в тридцатых годах для водоснабжения городов Новокузнецка и Красноярска первые каптажные сооружения в виде горизонтальных береговых водосборных галерей были построены в долинах рек Томь и Енисей, которые до сих пор успешно эксплуатируются. Примерно в этот же период инфильтрационные водозаборы были построены в Татарии и Башкирии, Грузии, на Северном Кавказе, Украине, в Прибалтийских республиках и других районах.

Второе направление по созданию искусственных запасов подземных вод характеризуется строительством на действующих водозаборах специальных поверхностных инфильтрационных сооружений (инфильтрационных бассейнов, траншей и др.) с целью увеличения производительности действующих каптажей.

Оригинальный способ создания искусственных запасов подземных вод осуществлен в Латвии для водоснабжения г. Риги. Здесь недалеко от источников питания — естественного озера —

была построена система поверхностных инфильтрационных бассейнов, куда подается вода из озера специальным трубопроводом.

В среднезернистых флювиогляциальных песках таким путем искусственно создается питание водоносного горизонта. На расстоянии 180—250 м от участка инфильтрационного питания здесь пробурена система собственно водозаборных скважин, с помощью которых отбираются из водоносного горизонта подземные воды в количестве более 100 000 м³/сут и подаются в городскую сеть. Более подробно система этого водозабора описана в отдельной главе.

В последние годы на Урале, в Узбекистане, на Украине и других районах Советского Союза получило развитие еще одно направление работ по созданию искусственных запасов подземных вод. Сущность его заключается в искусственном сезонном регулировании периодически создаваемых емкостных запасов подземных вод в мощных водопроницаемых породах и постоянном их отборе системой водозаборных скважин.

Значительное снижение уровней подземных вод в зоне развития депрессионной воронки в период отсутствия питания создает на таких участках речных долин благоприятные условия искусственного восполнения сработанных запасов путем интенсивной инфильтрации паводковых вод.

Как показывает опыт эксплуатации таких водозаборов, сработанные за сезон емкостные запасы подземных вод в паводковое время очень быстро и полностью возобновляются. Искусственное регулирование емкостных запасов позволяет при благоприятных условиях постоянно отбирать более 100 тыс. м³/сут, т. е. создавать высокопроизводительные водозаборы.

В орошаемых районах Советского Союза вдоль крупных ирригационно-обводнительных каналов в процессе их длительной эксплуатации создаются благоприятные условия для «попутного» формирования в породах зоны аэрации искусственных запасов в форме линз пресных вод. Приканальные линзы пресных подземных вод в данном случае образуются за счет неизбежной донной инфильтрации поверхностных вод в каналах, не имеющих изоляции. С точки зрения содержания рассматриваемой проблемы, ирригационные каналы можно рассматривать как инфильтрационные бассейны значительной протяженности, вдоль которых постоянно формируется напорная или безнапорная фльтрация.

В аридных зонах нашей страны, где часто распространены минерализованные грунтовые воды, пресные воды вдоль каналов формируются над их уровнем в виде плавающих линз. Ресурсы и запасы искусственно созданных приканальных линз пресных подземных вод нередко значительны; на базе их использования в нашей стране построен ряд скважинных водозаборных сооружений для целей водоснабжения городов и мелких населенных пунктов.

В нашей стране, к сожалению, не получило практического развития искусственное воспроизводство эксплуатационных запасов напорных вод на действующих водозаборах, хотя потребность в этом направлении работ давно созрела.

В этом отношении большой интерес представляют результаты опытных работ, проведенных на некоторых действующих водозаборах — в Крыму, Ленинграде и на Северо-Востоке. Так, например, были получены весьма обнадеживающие результаты нагнетания поверхностных вод Северо-Крымского ирригационно-обводнительного канала в водозаборные скважины, пройденные на площади артезианских бассейнов Степного Крыма, с целью воспроизводства ранее сработанных эксплуатационных запасов напорных вод и восстановления их качества.

Как известно, в Степном Крыму напорные воды мелких артезианских бассейнов используются для автономного орошения, и их непрерывная длительная эксплуатация привела в последние годы к значительному снижению напорных уровней и ухудшению качества за счет подтягивания снизу соленых вод. Завершение строительства и пуск в эксплуатацию Северо-Крымского канала создали весьма благоприятные условия для искусственного воспроизводства запасов напорных вод. Во время опытных работ в водозаборные скважины нагнеталась вода канала в количестве около 100 тыс. м³/сут.

Учитывая положительные результаты опытного нагнетания, в Степном Крыму намечается осуществить впервые в нашей стране в промышленном масштабе искусственное воспроизводство эксплуатационных запасов напорных вод с помощью нагнетания в скважины поверхностных вод Северо-Крымского канала.

Были также получены положительные результаты опытных работ по нагнетанию поверхностных вод в напорные водоносные горизонты на одном из действующих водозаборов г. Ленинграда и на Северо-Востоке на площади частично замороженного артезианского бассейна.

Следует подчеркнуть, что в нефтяной промышленности СССР накоплен довольно большой опыт нагнетания пресных вод в напорные горизонты с целью законтурного и внутриконтурного заводнения нефтяных месторождений. Очевидно, целесообразно учесть этот опыт при дальнейшем развитии работ по искусственному воспроизводству эксплуатационных запасов подземных вод.

Опыт использования в нашей стране пресных подземных вод для целей водоснабжения и орошения показывает, что искусственно созданные эксплуатационные запасы играют значительный удельный вес в общем водопотреблении. С учетом производительности инфильтрационных водозаборов и других типовых схем искусственные запасы пресных подземных вод составляют примерно 60% от общего их отбора из недр Земли.

В заключение отметим, что проблеме формирования искусственных запасов подземных вод в Советском Союзе за последние

годы уделяется большое внимание. В некоторых научно-исследовательских организациях страны созданы специальные научно-методические группы, лаборатории или отделы. Были проведены научно-технические совещания по искусственному восполнению запасов подземных вод (в Москве, Вильнюсе, Ташкенте). Опубликованные по итогам совещаний материалы имеют большой научный и практический интерес.

По линии международных организаций (главным образом ЮНЕСКО — ООН) состоялись научные симпозиумы в Соединенных Штатах Америки и в Нидерландах. Труды международных научных совещаний, в которых изложен мировой опыт и практика, опубликованы в изданиях ЮНЕСКО. Большое внимание проблеме искусственного восполнения пресных подземных вод уделяется в Международной программе гидрогеологического десятилетия, в которой Советский Союз принимает активное участие.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В нашей литературе нет пока общепринятых основных понятий и определений по проблеме искусственного формирования пресных подземных вод, в том числе общепринятой терминологии. Объясняется это тем, что вопросу не уделялось должного внимания, а разнообразные способы искусственного формирования подземных вод в достаточной степени не систематизировались и не обобщались.

В этом отношении целесообразно вначале дать приближенное определение гидрогеологической сущности проблемы.

Под гидрогеологической сущностью общей проблемы искусственного восполнения подземных вод принято понимать такой комплекс гидрогеологических и инженерно-технических мероприятий, который обеспечивает в заданном режиме (по качеству и количеству) дополнительное искусственное питание ресурсов подземных вод естественных продуктивных водоносных горизонтов, или искусственное формирование емкостных запасов в водоносных горизонтах либо в породах зоны аэрации. Это искусственное питание в отличие от естественного на водозаборных участках является целенаправленным, сосредоточенным обычно на небольшой площади влияния каптажного сооружения.

В этом правиле есть исключение, когда искусственное питание водоносного горизонта может происходить нецеленаправленно, под влиянием эксплуатации некоторых водохозяйственных объектов (водохранилищ, ирригационных каналов и др.).

Целесообразно уточнить классификации количественных категорий искусственно восполняемых подземных вод. В соответствии с предложениями Ф. П. Саварского в теории и практике гидрогеологических работ принято четко различать два понятия — ресурсы и запасы подземных вод.

По своему происхождению ресурсы и запасы подземных вод могут быть естественными и искусственными. Естественные запасы — это объем гравитационной воды, который заполняет открытые поры, трещины и карстовые полости в горных породах водоносного горизонта и формируется под влиянием природных факторов.

В напорном водоносном горизонте, кроме того, формируются упругие запасы — тот объем подземных вод, который может быть извлечен из водоносного горизонта при уменьшении пластового давления за счет упругих свойств воды и горных пород, но без осушения пласта. Естественные запасы, таким образом, имеют объемную размерность.

Под естественными ресурсами принято понимать величину постоянного или временного питания водоносного горизонта, которое происходит под влиянием природных факторов.

Н. Н. Биндеман и Л. С. Язвин справедливо отмечают, что величину питания следует рассматривать, как алгебраическую сумму поступления воды в водоносный горизонт и ее расходования. Поэтому естественные ресурсы имеют размерность расхода потока подземных вод в единицу времени.

В нашей литературе различают так называемые «привлекаемые запасы» подземных вод, т. е. такое их количество, которое привлекается в процессе эксплуатации водозаборными сооружениями, запасы, которые в естественных условиях расходуются на транспирацию растениями, на испарение, на родниковый сток и др.

По аналогии с отмеченным под искусственными запасами подземных вод следует понимать тот объем в пласте, который накапливается в горных породах под влиянием инженерной деятельности человека, т. е. под влиянием искусственных факторов. Наиболее характерным в этом отношении можно рассматривать магазинирование поверхностных вод, когда происходит их накопление в свободной природной емкости горных пород (в зоне аэрации), или в породах зоны полного водонасыщения.

Искусственные ресурсы — это, следовательно, дополнительное питание частично осушенного водоносного горизонта с помощью специальных инженерных сооружений. Эти мероприятия направлены на увеличение эксплуатационной возможности водоносного горизонта.

Таким образом, естественные ресурсы и запасы формируются в водоносном горизонте под влиянием природных факторов и не зависят от деятельности человека. Искусственные ресурсы и запасы формируются в земной коре под влиянием искусственных факторов. Количество и время формирования искусственных запасов подземных вод по существу искусственно управляются инженерной деятельностью человека.

В практике разведочных гидрогеологических работ в нашей стране принято еще одно понятие — эксплуатационные запасы подземных вод. Это понятие, как известно, регламентируется

требованиями действующей инструкции ГРЗ СССР. Согласно этой инструкции под эксплуатационными запасами подземных вод следует понимать то их количество, которое может быть получено из продуктивного водоносного горизонта рациональными в технико-экономическом отношении водозаборными сооружениями, при заданном режиме эксплуатации и при качестве воды, удовлетворяющем требованиям ГОСТа на весь расчетный период.

Эксплуатационные запасы со всеми другими видами количественных категорий подземных вод связаны известным балансовым уравнением:

$$Q_э = Q_{е.р} + \frac{Q_{е.з}}{T} + Q_{и.р} + \frac{Q_{и.з}}{T} + \Delta Q_{п},$$

где $Q_э$ — эксплуатационные запасы;

$Q_{е.р}$ — естественные ресурсы;

$Q_{е.з}$ — естественные запасы;

$Q_{и.р}$ — искусственные ресурсы;

$Q_{и.з}$ — искусственные запасы;

$\Delta Q_{п}$ — привлекаемые запасы;

T — время эксплуатации.

Важно уточнить некоторые понятия и их определения по искусственному формированию подземных вод в зависимости от принятой выше классификации их количественных категорий.

В. С. Усенко (1972) в этом отношении справедливо отмечает, что терминология в рассматриваемой проблеме очень разнообразна. В опубликованных материалах можно встретить термины «искусственное восполнение запасов», «искусственное создание запасов», «искусственное пополнение запасов», «искусственное обогащение запасов», «искусственное питание подземных вод», «магазинирование запасов» и др.

Целесообразно несколько уточнить в рассматриваемой проблеме некоторую терминологию, без претензии на ее безупречность.

Если рассматривать по существу процесса формирования искусственных ресурсов и запасов, то можно отметить следующее.

Одно из основных и наиболее эффективных направлений инженерной деятельности человека по искусственному формированию подземных вод состоит в обеспечении искусственного дополнительного питания частично осушенного продуктивного водоносного горизонта непосредственно на участке действующего водозабора. В этом случае (поскольку в продуктивном горизонте под влиянием эксплуатации водозабора уже создано постоянное возмущение естественного потока) при искусственном питании по существу не происходит накопления емкостных запасов подземных вод, а формируются ресурсы, расходуемые непосредственно на дебит действующего каптажного сооружения.

Такие инженерные мероприятия человека, направленные на искусственное питание продуктивного горизонта, находящегося в эксплуатации, справедливо было бы назвать **воспроизводством**

эксплуатационных запасов подземных вод на действующих водо-заборах. Это определение хорошо согласуется с аналогичной инженерной деятельностью человека, но уже в другой области, например, искусственном воспроизводстве лесных ресурсов, рыбных ресурсов и др. Наиболее подходящим в этом смысле является понятие — искусственное восполнение ресурсов подземных вод.

Если же инженерные мероприятия по искусственному формированию подземных вод приводят к накоплению в горных породах емкостных запасов с последующим их отбором, то такие способы хранения воды в природных емкостях можно назвать магазинированием поверхностных вод.

Наконец, при затоплении речных долин в равнинных водохранилищах под влиянием береговой инфильтрации поверхностных вод в породах зоны аэрации может искусственно формироваться новый водоносный горизонт. В этом водоносном горизонте будет происходить его постоянное искусственное питание, т. е. ресурсы подземных вод, и будут накапливаться емкости, т. е. запасы подземных вод. Такие гидрогеологические условия искусственного формирования подземных вод можно назвать смешанными.

Типизация и схемы гидрогеологических условий искусственного формирования подземных вод подробно рассмотрены во второй главе.

В практике искусственного восполнения подземных вод следует также различать такие понятия, как грязеемкость, кольматация, заиление, схема пленочной фильтрации, фильтроцикл и др.

На всех типах инфильтрационных сооружений в процессе искусственной подачи сырой воды всегда проявляются процессы кольматации фильтрующего слоя (в том числе фильтра нагнетательных скважин) и, как следствие заиления, пород зоны аэрации.

К о л ь м а т а ц и я — это процесс отложения в порах пород фильтрующего слоя взвешенных частиц, содержащихся в сырой воде. Ее можно оценить с помощью грязеемкости.

Г р я з е е м к о с т ь — это способность пористых и трещиноватых пород задерживать и накапливать в открытых пустотах в процессе инфильтрации сырой воды тонкой механической взвеси (мутности). Размерность параметра грязеемкости — $\text{кг}/\text{м}^2$. Численно этот параметр равен, следовательно, количеству механической взвеси, накопленной в порах или трещинах пород, отнесенному к единице поверхности фильтрующего слоя.

Дополнительное гидравлическое сопротивление, кроме кольматации пород фильтрующего слоя бассейна, обуславливается главным образом за счет образования на поверхности дна бассейна слоя илстой и биологической пленки. Именно поэтому аналитические зависимости для решения задач по оценке производительности инфильтрационных сооружений выполнены по схеме пленочной фильтрации. Пленочная фильтрация — это процесс просачивания в инфильтрационных сооружениях исходной

воды, содержащей взвешенные частицы (мути), через непрерывно растущий на дне сооружения илистый осадок (пленку).

В связи с ростом гидравлического сопротивления постепенно уменьшается общая производительность инфильтрационных сооружений до практически малого значения. По этой причине подача исходной воды в инфильтрационные бассейны обычно прекращается и сооружение останавливают на ремонт с целью регенерации фильтрующего слоя.

Продолжительность эксплуатации инфильтрационных сооружений от начала подачи сырой воды до остановки бассейна на ремонт называется фильтроциклом.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Проблема искусственного формирования подземных вод в верхней части гидрогеосферы Земли по существу своего содержания состоит из следующих тесно связанных разделов:

- а) геолого-гидрогеологического обоснования (включая характеристику источника питания);
- б) технологической схемы искусственного питания и ее физико-химических и биологических основ;
- в) технических средств для практического решения поставленных задач.

Таким образом, сама проблема является комплексной, к решению которой должны быть привлечены специалисты различного профиля: гидрогеологи, гидрологи, инженеры-сантехники, санитарные врачи, биохимики и, наконец, различного профиля специалисты по проектированию инженерных сооружений.

В настоящей работе рассматриваются только вопросы первого раздела общей проблемы, причем два других, хотя и тесно связанных, раздела имеют определенные специфические основы и поэтому должны быть рассмотрены самостоятельно.

Отметим только их сущность. Второй раздел проблемы охватывает главным образом физико-химические и биологические основы технологии искусственного питания подземных вод. Дело в том, что во всех схемах и инженерных сооружениях искусственного формирования подземных вод в качестве источника питания и их накопления используются поверхностные воды рек, озер, водохранилищ, временных (весенних) потоков. При миграции поверхностных вод в фильтрах инженерных сооружений и в горных породах зоны аэрации под влиянием физических, химических и биологических процессов происходит заметное ухудшение их качества.

Горные породы зоны аэрации в данной проблеме можно рассматривать как естественный фильтр, очищающий от загрязнений поверхностные воды при их инфильтрации. Самоочищающая способность горных пород и позволяет обеспечивать искусственное питание подземных вод высококачественными источниками.

На закономерностях этих процессов обычно разрабатывается технологическая схема искусственного формирования ресурсов и запасов подземных вод с учетом конкретных условий каждого объекта. Исключения из этих правил составляют трещиноватые и закарстованные породы, самоочищающая способность поверхностных вод которых при инфильтрации обычно незначительная.

Технологическая схема искусственного воспроизводства подземных вод, таким образом, зависит от качества исходной зоны

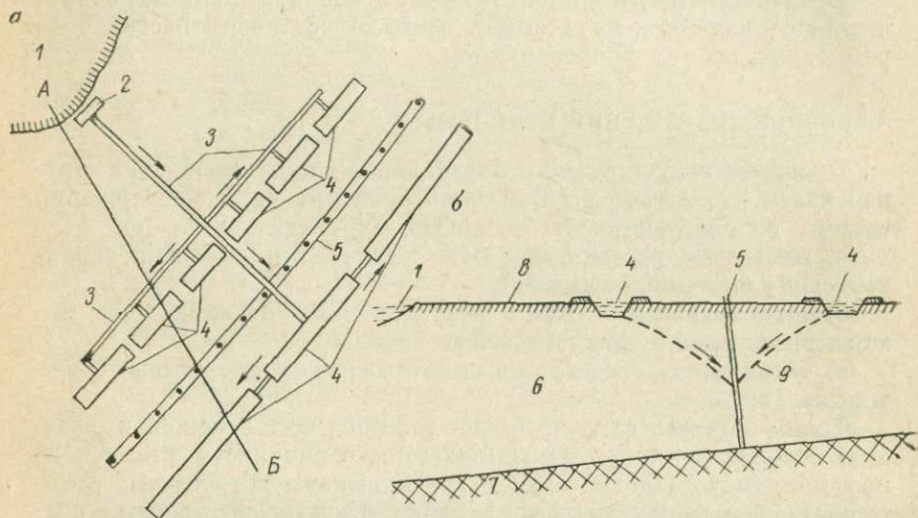


Рис. 1. Установка по искусственному воспроизводству эксплуатационных запасов подземных вод на действующем водозаборе.

а — план; б — разрез по А — Б. 1 — озеро; 2 — насосная станция; 3 — разводящий водовод; 4 — инфильтрационные бассейны; 5 — водозаборное сооружение; 6 — водопроницаемые породы; 7 — водонепроницаемые породы; 8 — почвенный покров; 9 — депрессионная воронка

(источника искусственного питания), геолого-гидрогеологических условий и конструкции инженерных сооружений.

Третий раздел общей проблемы посвящен разработке конструкций различных инженерных сооружений, которые обычно проектируются на том или ином объекте в соответствии с принятой технологической схемой искусственного формирования запасов подземных вод. Сюда следует отнести выбор конструкции поверхностных инфильтрационных сооружений для искусственного питания, разработки конструкции фильтров, очистных сооружений и др.

На рис. 1 представлена принципиальная схема примерного комплекса геолого-гидрогеологических и инженерно-технических мероприятий по искусственному воспроизводству эксплуатационных запасов подземных вод на участке действующего водозаборного сооружения.

В практике решения проблем искусственного формирования запасов и ресурсов подземных вод в Советском Союзе могут быть намечены три основных направления, которые определяются необходимыми геолого-гидрогеологическими условиями:

а) восполнение эксплуатационных запасов подземных вод непосредственно на участках действующих водозаборных сооружений;

б) целенаправленное magazинирование поверхностного стока и накопление его в природных геологических емкостях на новых площадях с последующим строительством каптажных сооружений для эксплуатации искусственно созданных подземных вод;

в) использование нецеленаправленных искусственно создаваемых ресурсов и запасов подземных вод при эксплуатации различных видов гидротехнических сооружений (ирригационно-обводнительных каналов, водохранилищ и др.).

На участках действующих водозаборов искусственное воспроизводство может осуществляться либо с целью предотвращения истощения запасов подземных вод в продуктивном горизонте, либо с целью увеличения общей их производительности в связи с заявленной дополнительной потребностью в воде; в некоторых случаях инженерные мероприятия могут быть направлены на искусственное улучшение качества подземных вод эксплуатационного горизонта. Искусственное воспроизводство эксплуатационных запасов подземных вод на участках действующих водозаборов в экономическом отношении является весьма эффективным и определяется следующими основными факторами:

— заявленной дополнительной потребностью в воде;

— наличием вблизи водозабора качественного источника воспроизводства ресурсов;

— литологическим составом, мощностью, фильтрационными, физико-химическими и биологическими свойствами горных пород зоны аэрации;

— достаточно хорошо изученными гидрогеологическими условиями, в том числе режимом эксплуатации;

— техническим состоянием водозабора;

— наличием участков для размещения поверхностных инженерных сооружений по искусственному воспроизводству эксплуатационных запасов;

— экономическими расчетами, определяющими рентабельность искусственного воспроизводства запасов.

Большую роль в выборе способов искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов играет также гидродинамический режим фильтрационного потока подземных вод на участке действующего водозабора — безнапорный или напорный режим фильтрации.

Для условий безнапорного режима потока в настоящее время накоплен достаточно большой опыт и можно выбрать в зависимости от местных гидрогеологических условий несколько способов

и технических приемов воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод — строительство поверхностных инфильтрационных бассейнов или траншей, направленное периодическое затопление площади развития депрессионной воронки на участке действующего водозабора, создание в речной долине каскада мелких водохранилищ и др.

Эти способы будут рассмотрены более подробно во второй главе.

Что касается воспроизводства эксплуатационных запасов напорных вод, то на участках действующих водозаборов в этом направлении накоплен пока небольшой опыт и по существу разработан единственный способ воспроизводства с помощью бурения нагнетательных скважин. Горные работы для искусственного питания напорных вод применяются в очень редких случаях.

Как будет показано ниже, гидрогеологические исследования для обоснования водопроизводства ресурсов подземных вод непосредственно на участках действующих водозаборов по своему содержанию входят в комплекс эксплуатационной разведки месторождений подземных вод. Таким образом, для участков действующих водозаборов довольно четко устанавливаются основные факторы, определяющие условия применения искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод, а также выбор основных направлений разведочных гидрогеологических работ.

Иные геолого-экономические и гидрогеологические условия и иная направленность гидрогеологических работ отмечается на новых участках, на которых искусственные запасы подземных вод формируются путем магазинирования поверхностного стока в природных геологических емкостях. Во-первых, эти участки слабо изучены в гидрогеологическом отношении; во-вторых, на новых участках отсутствуют водозаборные сооружения и впоследствии необходимо обосновать их строительство; в-третьих, требуется провести в выбранном районе специальные поисково-разведочные работы на изыскание природной подземной емкости и надежный источник магазинирования; в-четвертых, необходимо иметь конкретный потребитель и заявленную потребность в воде; в-пятых, на выбранном перспективном участке необходимо произвести в полном объеме весь комплекс разведочных гидрогеологических работ не только для оценки условий магазинирования, но и для обоснования в дальнейшем будущего водозаборного сооружения. Наконец, необходимо оценить экономическую целесообразность и конкурентоспособность источника водоснабжения, создаваемого путем искусственного магазинирования по сравнению с другими возможными вариантами.

Главным из перечисленных условий является гидрогеологическая характеристика горных пород, слагающих природную емкость для накопления емкостных запасов подземных вод. Горные породы, слагающие либо зону аэрации, либо зону полного

насыщения, должны обладать достаточной мощностью, в пределах которой проектируется магазинирование поверхностного стока (до 50—100 м и более), а также должны обладать хорошими фильтрационными свойствами (с коэффициентом фильтрации от 10—40 до 100—200 м/сут и более).

Не менее важным фактором является характеристика литологического и солевого состава горных пород и сорбционная их емкость. Присутствие в горных породах железистых, марганцевых, органических соединений, а также гумусовых отложений является противопоказанным для способа магазинирования поверхностных вод.

Как видно из краткого перечня основных положений, решение проблем магазинирования является более сложным и требует проведения большого комплекса гидрогеологических работ, которые по своему содержанию должны по существу отвечать принятой в СССР стадийности разведки месторождений подземных вод, в данном случае создаваемых искусственным путем.

При практическом использовании искусственных запасов подземных вод, которые формируются в породах зоны аэрации нецеленаправленно под влиянием инфильтрации поверхностных вод при длительной эксплуатации некоторых гидротехнических сооружений речь идет о поисках на площади искусственно созданных месторождений подземных вод, а также о разведке наиболее благоприятных участков для размещения водозаборных сооружений.

Гидрогеологические исследования в этих условиях по своей направленности являются аналогичными общепринятой постановке разведки подземных вод с учетом специфических условий их формирования и размещения. Методика их достаточно хорошо разработана и изложена в ряде опубликованных работ (Плотников, 1973; Н. Н. Биндеман, Л. С. Язвин, 1972 г., и др.).

Из рассмотренного материала настоящего раздела вытекают очень важные следующие выводы.

Проблема искусственного формирования ресурсов и запасов подземных вод является комплексной не только по своему содержанию, но и по значению в народном хозяйстве.

В связи с этим, например, искусственное воспроизводство эксплуатационных запасов подземных вод на действующих водозаборах необходимо расценивать как крупный экономический фактор, позволяющий полностью ликвидировать истощение запасов и снизить себестоимость отбираемого количества воды высокого качества. Как отмечалось выше, небольшие дополнительные капитальные затраты в этом случае могут позволить увеличить производительность действующего водозабора в несколько раз. При этом очень хорошо определяется комплектность всех сооружений на водозаборе.

Небольшой по объему комплекс гидрогеологических исследований и их результаты, позволяющие обосновать искусственное воспроизводство эксплуатационных запасов на действующих

водозаборах *следует рассматривать как реальные технические средства повышения эффективности разведочных гидрогеологических работ.* Разведанные запасы подземных вод при сравнительно небольших затратах на действующих водозаборах в 2—3 раза больше, чем при разведке новых участков.

Не следует забывать, что повышение производительности действующих водозаборов путем искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод не требует отчуждения значительного по площади дополнительного земельного фонда. Этот фактор в современную эпоху интенсивного развития производительных сил также является *существенным и затрагивает жизненно важные интересы охраны и защиты окружающей среды.*

Все это, вместе взятое, позволяет отметить, что *поисково-разведочные гидрогеологические исследования для обоснования искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод целесообразно проводить не только в остродефицитных районах нашей страны, но и во всех случаях разрешения проблем централизованного водоснабжения и по всей территории СССР.*

Этот вывод имеет принципиально важное значение для планирования поисково-разведочных работ и в первую очередь в новых районах развития производительных сил нашей страны.

Проблема создания искусственных запасов подземных вод имеет еще один очень важный аспект. Как известно, при длительной эксплуатации подземных вод на водозаборных сооружениях происходит коренное преобразование окружающей среды, в котором существенное значение имеют гидрогеологические условия.

При длительной эксплуатации подземных вод, особенно грунтовыми водозаборами, очень интенсивно проявляются техногенные процессы — осушение части продуктивного горизонта и полное осушение вышележащих горизонтов, дренирование в сфере влияния водозабора родников, колодцев, одиночных гидрогеологических скважин и др., вторичная консолидация осушенных рыхлых пород и как следствие деформации поверхности и поверхностных сооружений.

Под влиянием техногенных процессов происходит, таким образом, коренное изменение качества преобразованной окружающей среды.

Опыт нашей страны и зарубежных стран показывает, что в этом отношении *искусственное воспроизводство запасов подземных вод на действующих водозаборных сооружениях следует также рассматривать как действенные меры охраны и защиты окружающей среды.*

Такое сочетание мероприятий будет способствовать рациональному использованию природных ресурсов. В этом и состоит успех экономики и эффективности комплексной проблемы искусственных запасов подземных вод — пути рационального использования и охраны их от истощения и загрязнения.

СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ

Несмотря на имеющийся опыт по искусственному формированию запасов и ресурсов подземных вод, рассматриваемая проблема как в теоретическом аспекте, так и в практическом отношении разработана еще неполно, в том числе слабо разработаны и гидрогеологические основы общей проблемы.

Не разработана в достаточном объеме методика гидрогеологических исследований. Изложенные в настоящей работе эти вопросы следует рассматривать как одну из попыток временной регламентации и последовательности исполнения и методические приемы проведения большого комплекса исследований с целью обоснования искусственного воспроизводства ресурсов подземных вод. Особенно это относится к методике проведения опытно-фильтрационных работ (в полупромышленном масштабе), которые проводятся обычно в завершающую стадию поисково-разведочных работ на объекте с целью изучения условий инфильтрационного питания будущих сооружений.

Накопленный опыт показывает, что довольно часто инфильтрационные береговые сооружения (преимущественно в речных долинах) и различной конструкции поверхностные инфильтрационные сооружения для искусственного питания подземных вод в процессе длительной эксплуатации снижают свою производительность и требуют периодически капитального ремонта. Это снижение производительности происходит постепенно за счет кольматации и заиления русловых отложений реки или фильтрационного слоя сооружения, кольматации фильтра нагнетательных скважин.

Кольматация и заиление русловых отложений реки, фильтрующего слоя инфильтрационных сооружений или фильтров нагнетательных скважин характеризуются очень сложными физическими, химическими и биологическими процессами. Прогноз и формирование этих процессов, развитие их во времени, глубине распространения и др. разработаны в настоящее время очень слабо и являются довольно сложной теоретической проблемой.

Механические процессы обычно приводят к образованию илисто-глинистого осадка на поверхности фильтрующего слоя, а также к миграции тонких фракций глин в поры водоносного горизонта.

Под влиянием физико-химических процессов в водопроницаемых породах происходит выпадение в осадок различных химических соединений, в основном гидратов окиси железа, карбонатов и сульфатов кальция.

Проявления биологических процессов при искусственном питании водоносного горизонта приводит к зарастанию фильтров скважин за счет развития железистых или сульфатредуцирующих бактерий.

В результате проявления всех этих процессов происходит снижение водопроницаемой способности русловых отложений рек,

фильтрующего слоя инфильтрационных сооружений, фильтров нагнетательных скважин; увеличивается гидравлическое сопротивление фильтрационного потока. Именно под влиянием этих процессов инфильтрационные сооружения постепенно снижают свою производительность.

В связи с этим, возникает несколько очень важных научно-исследовательских задач, разрешение которых позволит повысить эффективность всей проблемы искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод.

Во-первых, требуется проведение специальных теоретических исследований по изучению механизма формирования перечисленных выше процессов. Требуется также разработать различные эффективные способы рекультивации русловых отложений реки, фильтрационного слоя открытых инфильтрационных сооружений с целью восстановления их водопроницаемых свойств.

Во-вторых, при оценке эксплуатационных запасов подземных вод с учетом искусственного их питания требуется как-то учитывать возможное снижение во времени общей расчетной производительности водозабора.

Основная задача в этом случае состоит в правильном научно обоснованном прогнозировании дебита водозаборных сооружений, работающих в условиях искусственного их питания. Пока такая научно обоснованная методика разработана слабо.

По этой причине ГКЗ СССР и предъявляет серьезные претензии к результатам оценки эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного воспроизводства.

Слабо разработана методика выбора наиболее рациональных конструкций фильтров нагнетательных скважин различных конструкций поверхностных инфильтрационных сооружений в зависимости от конкретных литолого-геологических и гидрогеологических условий изучаемого объекта. Это положение относится к инфильтрационным сооружениям открытого типа (бассейна, траншеи, щели и др.), а также скважинного типа (поглощающие или нагнетательные буровые скважины).

Недостаточно точно разработана методика подготовки так называемой «сырой воды» для искусственного питания, требования, предъявляемые к ее качеству, в том числе к допустимым нормам химического загрязнения.

В стадии разработки находятся методы оценки сорбционных свойств различных литологических разностей горных пород, слагающих зону аэрации и используемых при искусственном питании подземных вод в качестве естественного химико-бактериального фильтра.

Не полностью отмеченные выше не решенные еще задачи предъявляют серьезные требования к творческому проведению всего комплекса гидрогеологических исследований для обоснования искусственного питания подземных вод. Вместе с этим крайне необходимо в ведущих научно-исследовательских организациях

нашей страны систематически планировать проведение работ по дальнейшей разработке теоретических основ и методов исследований по проблеме искусственного воспроизводства ресурсов и запасов пресных подземных вод.

МЕСТО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПРОИЗВОДСТВА ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СОВРЕМЕННОЙ ГИДРОГЕОЛОГИИ

Итак, гидрогеологические исследования являются одним из основополагающих условий правильного решения проблемы искусственного формирования подземных вод в самых различных ее направлениях. В связи с этим очень важно определить место этих исследований в общем комплексе разведочных гидрогеологических работ.

В настоящее время общепринято выделение в современной прикладной гидрогеологии очень важного для практики такого направления работ — как разведочная гидрогеология (О. К. Ланге, Н. И. Плотников, 1973, 1976 гг.). Это прикладное направление посвящено поискам, разведке и оценке эксплуатационных запасов различных типов подземных вод, в том числе пресных подземных вод для водоснабжения, орошения или обводнения.

Содержание разведочной гидрогеологии, как известно, состоит из четырех, тесно связанных разделов (Н. И. Плотников, 1973 г.).

1. Гидрогеологические основы поисков и разведки, изучающих общие закономерности формирования и размещения в верхней части земной коры различных промышленных типов месторождений подземных вод.

2. Методики поисков и разведки, в которой рассматриваются методы размещения и выбора рациональных расстояний между поисково-разведочными профилями, буровыми скважинами, выбор глубин разведки и др.

3. Методики проведения различных видов гидрогеологических работ.

4. Оценки эксплуатационных запасов подземных вод и разработки рекомендации по рациональным условиям освоения месторождений подземных вод.

Вместе с этим следует напомнить, что в практику разведки месторождений подземных вод достаточно прочно вошел принцип последовательных приближений наших знаний об объекте, т. е. принцип стадийности исследований.

Наряду с этим в последнее время в нашей стране остро назрели требования по новой проблеме — охране и защите окружающей среды, изучению роли подземных вод в формировании ее качества в процессе коренного преобразования природных условий, происходящего под влиянием техногенной деятельности человека. И, наконец, современная проблема, которой посвящена настоящая

работа, — формирование искусственных запасов подземных вод в верхней части гидрогеосферы Земли.

Нет сомнения в том, что перечисленные выше проблемы являются самостоятельными, но вместе с тем по своему содержанию они тесно связаны и направлены к достижению одной цели — рациональному использованию природных ресурсов. Поэтому решение основных разделов этих проблем должно выполняться комплексно, совместно и в некоторых случаях с одновременным проведением комплексных исследований по разведке подземных вод и изучению возможности искусственного их воспроизводства. При этих условиях можно достигнуть научно-технического прогресса в разведочной гидрогеологии.

В самом деле в последние годы в нашей стране резко возросла потребность в питьевой воде, в том числе возросли потребности в более интенсифицированном использовании подземных вод. При разрешении централизованного водоснабжения крупных объектов часто сооружаются групповые водозаборы, нередко взаимодействующие между собой.

В дальнейшем, как правило, во всех объектах происходит систематический рост водопотребления и в связи с этим возникает необходимость увеличения производительности действующих водозаборов, либо путем расширения самого каптажного сооружения, либо путем искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов.

Наряду с этим при интенсифицированном отборе подземных вод (как отмечалось выше) на площади депрессионной воронки действующих водозаборов происходит коренное преобразование природных гидрогеологических условий и изменение режима окружающей среды. Техногенные процессы ухудшают на определенной площади влияния водозаборов качество окружающей среды. В данном случае также необходимо проводить специальные исследования с целью принятия мер к восстановлению или улучшению окружающей среды. Одним из путей решения таких задач являются мероприятия по дополнительному искусственному питанию действующих водозаборов.

Изложенное позволяет сделать следующий важный вывод — гидрогеологические исследования с целью обоснования искусственного воспроизводства или искусственного создания запасов подземных вод: а) должны рассматриваться как средства повышения эффективности гидрогеологических работ, поэтому должны входить составной частью в общий комплекс гидрогеологических работ по поискам, разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод; б) следует рассматривать как одно из радикальных средств защиты окружающей среды, преобразованной под влиянием техногенной деятельности человека.

Все это дает основание рекомендовать при поисково-разведочных работах на новых месторождениях подземных вод проводить одновременно исследования с целью предварительной оценки

условий искусственного воспроизводства эксплуатационных их запасов на площади будущего водозаборного сооружения. В перспективе при дополнительной потребности в воде на объекте это позволит четко определить состав и объемы гидрогеологических работ с целью обоснования увеличения дебита каптажного сооружения путем искусственного воспроизводства запасов подземных вод.

Целесообразно также (в случае необходимости) включать в состав эксплуатационной разведки подземных вод, которая обычно проводится на участках действующих водозаборов, специальные исследования по искусственному воспроизводству эксплуатационных запасов подземных вод, рассматривая в то же время эти исследования и как средства борьбы с отрицательным воздействием техногенных процессов на окружающую среду.

При такой постановке комплексных исследований можно обеспечить значительный научно-технический прогресс в производстве разведочных гидрогеологических работ.

В тех случаях, когда гидрогеологические исследования проводятся целенаправленно для обоснования magazинирования поверхностных вод в подземных природных емкостях, эти исследования можно рассматривать как поисково-разведочные работы.

СПОСОБЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИСКУССТВЕННОГО ВОСПРОИЗВОДСТВА ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Конечной целью разведочных гидрогеологических работ, выполняемых для искусственного воспроизводства подземных вод, является оценка их эксплуатационных запасов. Во многих случаях она выполняется методом аналитических расчетов или математического моделирования (для сложных условий) применительно к выбранному способу, техническим средствам и технологической схеме искусственного питания запасов подземных вод.

Как отмечалось ранее, проблема искусственного воспроизводства и магазинирования подземных вод по своему содержанию является комплексной.

Разработка технологической схемы (способы и режим искусственного питания, технология подготовки сырой воды, конструкции инженерных сооружений, режим питания и др.) хотя и занимает самостоятельный раздел общей проблемы, однако всегда тесно увязывается с гидрогеологическими основами. Именно на базе исходных геологических, климатических, гидрологических и гидрогеологических данных проектные организации для освоения нового конкретного объекта производят разработку технологической схемы и проектирование всех инженерных сооружений на водозаборе.

Вместе с этим (как показывает практика) природные условия изучаемого объекта во многих случаях оказывают существенное влияние на выбор способа и технологической схемы искусственного воспроизводства запасов подземных вод. Причем выбор должен быть сделан на ранней стадии проведения разведочных гидрогеологических работ. В свою очередь выбранный способ и технологическая схема (как это будет подробно изложено ниже) определяют методику проведения основных видов разведочных гидрогеологических работ.

Такая тесная взаимообусловленность основных положений общей проблемы требует от специалиста гидрогеолога определенного объема общих знаний по инженерной части проблемы, о способах и технологических схемах искусственного воспроизводства и магазинирования запасов подземных вод.

Исходя из этих соображений, ниже приводится краткая характеристика наиболее распространенных способов и инженерных

сооружений, применяемых при искусственном восполнении запасов подземных вод.

Более подробно материал этой общей проблемы приведен в работах В. М. Григорьева (1958 г.), В. С. Усенко (1972 г.) и др.

Краткий обзор не преследует цели охватить все возможные способы искусственного воспроизводства запасов подземных вод, однако он является вполне достаточным для общего ознакомления одного из существенных разделов проблемы. Все известные в на-

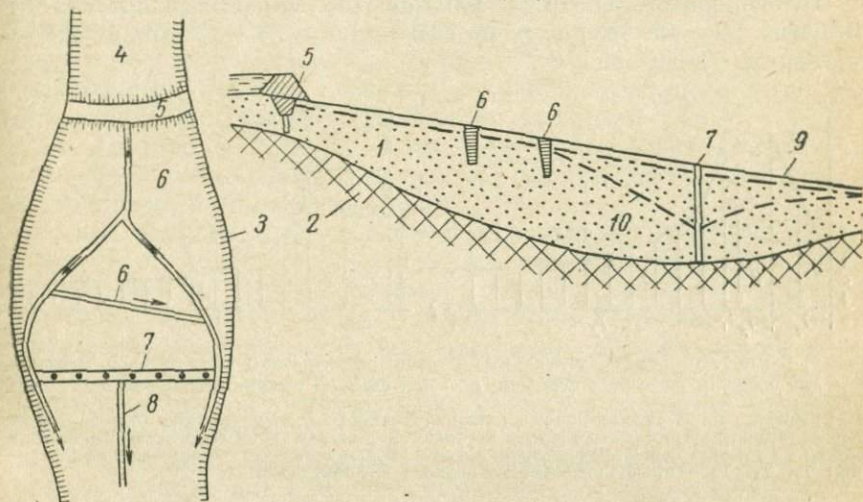


Рис. 2. Схема искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод с помощью инфильтрационных траншей.

1 — водоносные пески, галечники; 2 — водонепроницаемые породы; 3 — контур речной долины; 4 — водохранилище сезонного стока; 5 — земляная плотина; 6 — инфильтрационные траншеи; 7 — водозабор; 8 — самотечный водовод; 9 — уровень грунтовых вод; 10 — депрессионная воронка

стоящее время способы искусственного воспроизводства и магацинирования подземных вод по их конструктивным особенностям можно подразделить на три группы:

- 1) поверхностных открытых сооружений;
- 2) подземных сооружений;
- 3) комбинированных сооружений.

К первой группе можно отнести ряд различных инженерных сооружений, предназначенных для управления процессами искусственного питания подземных вод путем площадной инфильтрации поверхностных вод, а именно: инфильтрационные бассейны, траншеи, каналы, галереи и др. Эти сооружения обычно устраиваются на поверхности в непосредственной близости от водозабора подземных вод (рис. 2; см. рис. 1).

В конструктивном отношении инфильтрационные сооружения обычно углубляются ниже почвенного покрова на 1—2, реже 3 м в хорошо проницаемые породы зоны аэрации.

В практике работ по искусственному воспроизводству запасов подземных вод принято считать, что могут быть два типа инфильтрационных бассейнов: а) капитального и б) облегченного.

Бассейны капитального типа представляют собой выемки в фильтрующих породах зоны аэрации с тщательно спланированным в горизонтальном направлении плоским дном. В некоторых случаях дно бассейна засыпается так называемым фильтрующим слоем — отсортированный песок мощностью 0,3—0,5 м.

Откосы капитального бассейна обычно закрепляются плитами. Ширина бассейна по дну чаще всего до 15—20 м, длина до 250—

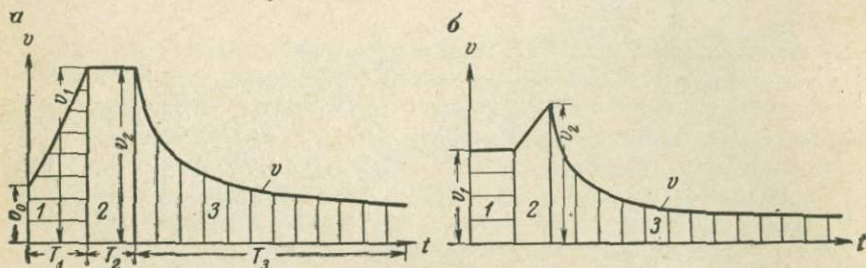


Рис. 3. Схема работы инфильтрационных бассейнов капитального типа (по Т. В. Бурчак): а — при сложном режиме заполнения; б — при быстром режиме заполнения сырой водой.

1 — первый период инфильтрации с начальной скоростью инфильтрации v_1 ; 2 — второй период инфильтрации с относительно постоянной максимальной скоростью инфильтрации v_2 ; 3 — третий период инфильтрации с затухающей во времени скоростью инфильтрации; T_1 , T_2 , T_3 — продолжительность периода инфильтрации

300 м; глубина наполнения бассейна водой при эксплуатации обычно составляет 1—2 м. Наиболее приемлемая мутность сырой воды для инфильтрации в бассейнах должна быть не более 10—20 мг/л.

Бассейны облегченного типа отличаются более простым устройством и простыми приемами эксплуатации. Строятся они в виде выемок путем обвалования площади инфильтрации; при этом откосы бассейна крепятся.

Бассейны капитального типа применяются непосредственно при строительстве водозаборного сооружения. Бассейны облегченного типа часто применяются на водозаборах, а также при разведке объекта с целью проведения опытно-фильтрационных работ.

При разработке технологической схемы искусственного воспроизводства запасов подземных вод, а также в процессе проведения опытно-фильтрационных работ обычно учитывается простой и сложный режимы инфильтрации в бассейнах.

Простой режим искусственного восполнения подземных вод характеризуется тем, что эксплуатация бассейна происходит преимущественно либо при постоянной глубине наполнения его водой, либо при постоянной скорости инфильтрации.

При сложном питании четко выделяются три периода режима инфильтрации в бассейнах (рис. 3).

Как видно из графика (см. рис. 3), в третьем периоде режима отмечается постепенное затухание скорости инфильтрации за счет увеличения гидравлического сопротивления заcolmатированного слоя и образования илистой пленки. Поэтому происходит заметное снижение общей производительности инфильтрационного бассейна. При этом на общую производительность бассейна будет оказывать влияние толщина илистой пленки и значение коэффициента фильтрации заcolmатированного слоя.

Обычно после третьего периода бассейн останавливается на очистку (ремонт) и регенерацию фильтрующего слоя. Период времени от начала пуска бассейна и до его остановки на ремонт (для очистки илистой пленки и заcolmатированного слоя) называется инфильтрационным циклом питания.

Однако не во всех случаях и не всегда можно наблюдать описанный выше периодический цикл режима фильтрации потока в инфильтрационных сооружениях.

Опыт эксплуатации некоторых инфильтрационных бассейнов, траншей и других сооружений на действующих водозаборах показывает, что илстая пленка и процессеcolmатации фильтрующего слоя развиваются медленно во времени, поэтому общая производительность сооружений длительное время почти не изменяется. Объясняется это тем, что подаваемая в инфильтрационные сооружения сырая вода является чистой и почти не содержит взвешенного материала.

По данным С. Ш. Мирзаева, проводившего опытные работы по искусственному питанию подземных вод на водозаборах Узбекистана, степеньcolmатации фильтрующего слоя и образование илистой пленки в открытых сооружениях резко сокращаются, когда подача сырой воды в бассейн производится в проточном режиме. При большой мощности покровных образований (более 3—5 м), в некоторых случаях строительство инфильтрационных бассейнов становится экономически нецелесообразным, тогда строят инфильтрационные траншеи (см. рис. 2).

К этой же группе способов искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод на действующих водозаборах можно отнести также направленную площадную инфильтрацию поверхностных вод в зоне периодического или постоянного затопления, пойменной и надпойменной террас речных долин. Для искусственного питания подземных вод этим способом требуются, во-первых, благоприятные природные условия в речных долинах, а во-вторых, строительство оградительных земляных дамб — обвалование затопляемой территории.

С помощью таких, довольно простых поверхностных сооружений достигается интенсификация инфильтрации речных вод непосредственно в зоне формирования депрессионной воронки действующего водозабора (рис. 4, 5).

Обычно зона затопления устраивается на площади распространения первой надпойменной террасы. Молодые речные террасы

сложены хорошо водопроницаемыми песчано-галечниковыми образованиями. Покровные мелкозернистые отложения на поверхности пойменной и надпойменной террас, как правило, отсутствуют, либо их мощность весьма незначительна.

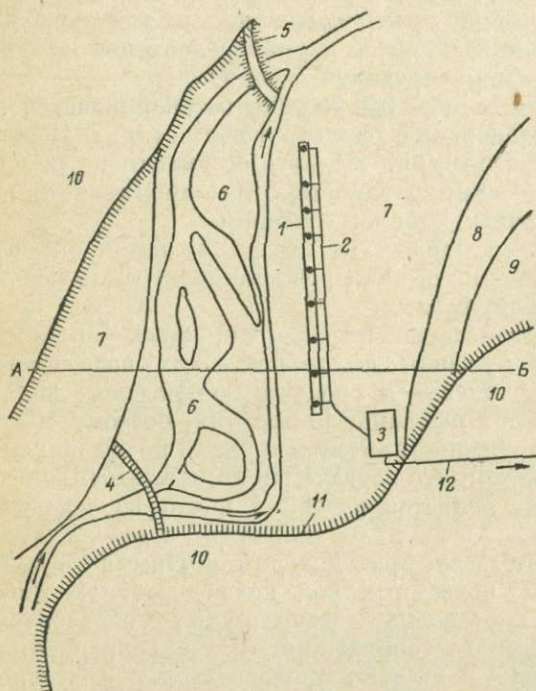


Рис. 4. Схема искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод на действующем водозаборе методом периодического затопления зоны питания.

1 — действующий водозабор; 2 — сборная линия водозабора; 3 — насосная станция второго подъема; 4 — распределительная плотина; 5 — водоудерживающая дамба; 6 — затопляемая надпойменная терраса, сложенная песчано-галечниковыми образованиями; 7 — вторая надпойменная терраса, сложенная покровными суглинками (2—3 м), подстилаемыми песчано-галечниковыми отложениями; 8, 9 — третья и четвертая надпойменные террасы; 10 — верхняя терраса, сложенная коренными породами; 11 — контур речной долины; 12 — напорный водовод

Первая группа технических средств, как видно из краткого описания, предназначена для искусственного питания грунтовых вод, залегающих неглубоко от поверхности на первом водоупорном горизонте. Мощность зоны аэрации при этом незначительная и изменяется, как показывает опыт, от 3—5 до 10 м.

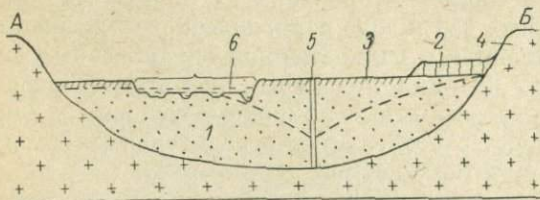


Рис. 5. Разрез по линии А — Б.

1 — водоносные песчано-галечниковые отложения; 2 — покровные суглинки; 3 — почвенный слой; 4 — коренные, слабо проницаемые породы; 5 — действующий водозабор; 6 — площадь периодически затопляемой первой надпойменной террасы

Эффективность и экономичность сооружений первой группы может быть достигнута, если покровные слабопроницаемые образования на открытом полигоне незначительные.

Достоинство сооружений первой группы состоит в том, что при использовании источника искусственного питания не тре-

буется тщательной предварительной подготовки сырой воды. Породы зоны аэрации используются в данном случае, как естественный фильтр. При снижении в процессе эксплуатации производительности инфильтрационных сооружений можно применять довольно простые способы ее восстановления (методом механического удаления илистой пленки по дну сооружения). Опыт показывает, что в течение года достаточно двукратного удаления илистой пленки, чтобы полностью восстановить производительность инфильтрационных бассейнов.

Положительным также является надежность действия при эксплуатации поверхностных инфильтрационных сооружений, эксплуатация их довольно простая, а использовать такие технические средства можно практически неограниченные сроки. Преимущество сооружений открытого типа состоит еще и в том, что с их помощью можно обеспечить большую площадь инфильтрации поверхностных вод, т. е. интенсифицировать процесс искусственного питания водозаборного сооружения.

По этим причинам инфильтрационные сооружения открытого типа в практике искусственного восполнения запасов подземных вод получили более широкое применение по сравнению с сооружениями закрытого типа — поглощающих или нагнетательных скважин. Однако применение инженерных сооружений первой группы лимитируется определенными условиями. Во-первых, на действующем водозаборном участке необходимо иметь свободную площадь для размещения поверхностных сооружений. И не просто площадь, а территорию, геолого-гидрогеологические условия которой являются благоприятными для обеспечения инфильтрации поверхностных вод — искусственного питания подземных вод в необходимом количестве.

Число инфильтрационных бассейнов на одном водозаборном участке может быть различным, в зависимости от заданной их производительности — от 3—5 до 10—15 бассейнов и более. При выборе общего количества бассейнов учитывается необходимость их периодической очистки от илстого и закольматированного слоя с сохранением постоянной производительности водозабора. Поэтому часть инфильтрационных сооружений обычно находится в работе, часть в ремонте.

- Все эти вопросы должны в предварительном виде рассматриваться на стадии проведения разведочных гидрогеологических работ, чтобы впоследствии избежать ошибок в обеспечении необходимой общей производительности всех инфильтрационных сооружений.

Во-вторых, на технологический режим питания инфильтрационных сооружений первой группы могут оказывать влияние климатические условия района расположения объекта. Открытые сооружения обычно не защищены от воздействия отрицательных температур воздуха и зимой при определенных условиях могут полностью промерзнуть.

В-третьих, при большом количестве инфильтрационных сооружений очень сложная организация зон санитарной охраны.

Ко второй группе технических средств можно отнести инфильтрационные сооружения подземного типа — буровые скважины (для налива и нагнетания), шурфы, мелкие шахты, наклонные горные выработки.

Отличительная особенность технических средств второй группы состоит в том, что инфильтрация поверхностных вод в направленном режиме происходит не на поверхности земли и не по площади, а внутри проницаемых пород в виде точечного нагнетания. Такие условия питания иногда называют «внутригрунтовой инъекцией».

Как показывает имеющийся опыт, технические средства второй группы применяются главным образом при искусственном воспроизводстве эксплуатационных запасов относительно глубоко залегающих напорных вод, а также с целью магазинирования поверхностного стока в породах зоны аэрации, в том числе для создания линз пресных вод. С целью искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов напорных вод на действующих водозаборах часто требуется бурение наиболее глубоких нагнетательных (поглощающих) скважин (в среднем от 100 до 300 м). В этом случае очень важно всесторонне изучать гидрогеологические условия залегания и распространения напорного горизонта, что позволит выбрать для данных конкретных условий технические средства для искусственного питания подземных вод.

Нагнетательные скважины для искусственного питания продуктивного горизонта относятся непосредственно к геологоразведочному типу сооружений, поэтому целесообразно обратить внимание на некоторые технические стороны их проведения. Собственно нагнетательная скважина (как сооружение) состоит из нескольких составных частей: ствола скважины, фильтра для приема нагнетания и устьевого оборудования.

Учитывая, что нагнетание сырой воды требует очень тонкой технологии (режима и скорости нагнетания), к бурению нагнетательной скважины предъявляются повышенные требования. Во-первых, необходимо в каждом конкретном случае правильно выбрать способ и технологию бурения нагнетательных скважин. Нагнетание сырой воды очень чувствительно к таким факторам, как остаточная глинистая корка по всему стволу выработки, остаточный буровой шлам и условия вскрытия продуктивного горизонта. Поэтому бурение нагнетательных скважин с помощью глинистой промывки считается обычно неприемлемым.

Во-вторых, нагнетательная скважина должна быть оборудована в призабойной части очень эффективной конструкцией фильтра, учитывающей в каждом конкретном случае гидрогеологические особенности изучаемого объекта.

При неудачно выбранной технологии бурения и конструкции фильтра нагнетательные скважины в процессе опытных работ, и тем более эксплуатации, очень быстро теряют свою преми-

мость, практически выходят из строя и требуют частого ремонта.

Важное значение для оценки эксплуатационных запасов напорных вод с учетом искусственного их питания имеет выбор режима нагнетания сырой воды в продуктивный горизонт. В этом отношении различают два типа режима нагнетания: непрерывное питание и прерывистое, или периодическое, нагнетание.

Первый тип режима нагнетания обычно применяется на водозаборных сооружениях, предназначенных для хозяйственно-питьевого водоснабжения, а второй — на объектах, предназначенных для орошения, где, как известно, отбор подземных вод производится только в вегетационный период.

Небольшой накопленный опыт в этом отношении показывает, что выбор конструкции нагнетательных скважин необходимо производить с учетом технологии режима их эксплуатации. В зависимости от геолого-гидрогеологических условий водозаборного участка, режима эксплуатации и схемы расположения выработок на действующем водозаборе, нагнетательные (поглощающие) скважины для искусственного питания напорных вод могут располагаться в виде одного, двух линейных рядов (параллельно расположению водозаборных скважин) или по схеме кольцевой батареи (см. рис. 3). Для всех этих схем имеются аналитические решения оценки эксплуатационных запасов напорных вод.

На водозаборных участках, где каптажные выработки работают периодически (например, водоотбор подземных вод для автономного орошения), для искусственного воспроизводства ранее сработанных запасов напорных вод могут быть использованы те же эксплуатационные скважины.

Опыт показывает, что буровые скважины двойного, периодически переменного назначения по системе отбор — нагнетание являются очень эффективными. Однако в этом случае требуется разработка соответствующих конструкций фильтров, бесперебойно работающих в условиях переменного режима.

Такие инфильтрационные сооружения второй группы, как шурфы, мелкие наклонные или вертикальные шахты, могут проектироваться в зоне естественного питания, недалеко удаленной от водозабора, где подземные воды мелких артезианских бассейнов имеют безнапорный режим. Следует отметить, что в практике работ по искусственному воспроизводству запасов напорных вод с помощью горных выработок накоплен небольшой опыт.

Преимущество инфильтрационных сооружений для нагнетания состоит в том, что на водозаборном участке не требуется большой площади для их размещения. Организация зон санитарной охраны при этом в значительной степени упрощается. Исключение в этом отношении представляют сооружения, предназначенные для magazинирования поверхностных вод в породах зоны аэрации, где требуются сравнительно большие площади для сбора и аккумуляции поверхностных вод, а также для организации зон санитарной охраны.

Использование горных выработок в качестве инфильтрационных сооружений экономически очень целесообразно, так как их производительность выше, чем скважин, а эксплуатация не требует частых капитальных ремонтов.

Существенным недостатком применения в практике нагнетания или налива поверхностных вод с помощью системы буровых скважин является постепенное уменьшение в процессе их эксплуатации общей производительности (приемистости). Снижение приемистости скважин во многих случаях происходит под влиянием механических, химических и биологических процессов, которые приводят к зарастанию пор и коагуляции фильтров. Способы борьбы с этими процессами в настоящее время разработаны слабо, а известные методы восстановления приемистости нагнетательных скважин являются трудоемкими и малоэффективными.

Другим существенным недостатком применения буровых скважин для искусственного питания напорных вод является очень тщательная подготовка сырой воды для нагнетания. Необходима специальная аэрация, отстаивание, дополнительная очистка через специальные фильтры (микрофильтрация), хлорирование и др.

К недостаткам применения нагнетательных скважин для искусственного воспроизводства запасов напорных вод следует также отнести сложность и трудоемкость организации работ и особенно в период их эксплуатации. Сложность состоит в том, что каждая нагнетательная скважина требует устьевого обустройство специальным насосным оборудованием и измерительной аппаратурой; скважины способны обеспечить подачу сырой воды в продуктивный горизонт в ограниченном объеме. Трудоемкость способа состоит в высокой стоимости эксплуатации нагнетательных скважин по сравнению с поверхностными сооружениями и в частых ремонтах с целью восстановления приемистости выработок.

К третьей группе можно отнести такие технические средства, которые по своему содержанию представляют наиболее рациональное сочетание открытых и подземных сооружений, создаваемых с целью интенсификации искусственного питания подземных вод. Эффективность третьей группы технических приемов в практике работ по искусственному воспроизводству эксплуатационных запасов подземных вод и магазинированию еще слабо опробована. В связи с этим их следует рассматривать как поиски наиболее рациональных средств по интенсификации искусственного воспроизводства запасов подземных вод.

Как видно из краткой характеристики способов воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод и магазинирования поверхностных вод требуется дальнейшее совершенствование конструкций существующих технических средств и разработка новых, более совершенных конструкций. В частности, в зарубежной практике нашло применение искусственное питание грунтовых вод с помощью комбинированного способа вертикальных и горизонтальных скважин (типа лучевых водозаборов).

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ РЕСУРСОВ И ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ

Гидрогеологической основой выбора того или иного направления поисково-разведочных работ с целью обоснования искусственного воспроизводства ресурсов и запасов подземных вод, являются общие закономерности и условия их формирования.

Общим и закономерным в рассматриваемой проблеме является трансформация поверхностных вод в подземные природные емкости с целью искусственного питания или искусственного аккумулирования подземных вод и дальнейшего их практического использования.

Эти закономерности имеют некоторые особенности в зависимости от различных природных условий выбранного объекта, режима источника питания, технологии искусственного формирования, а также от условий режима фильтрационного потока подземных вод.

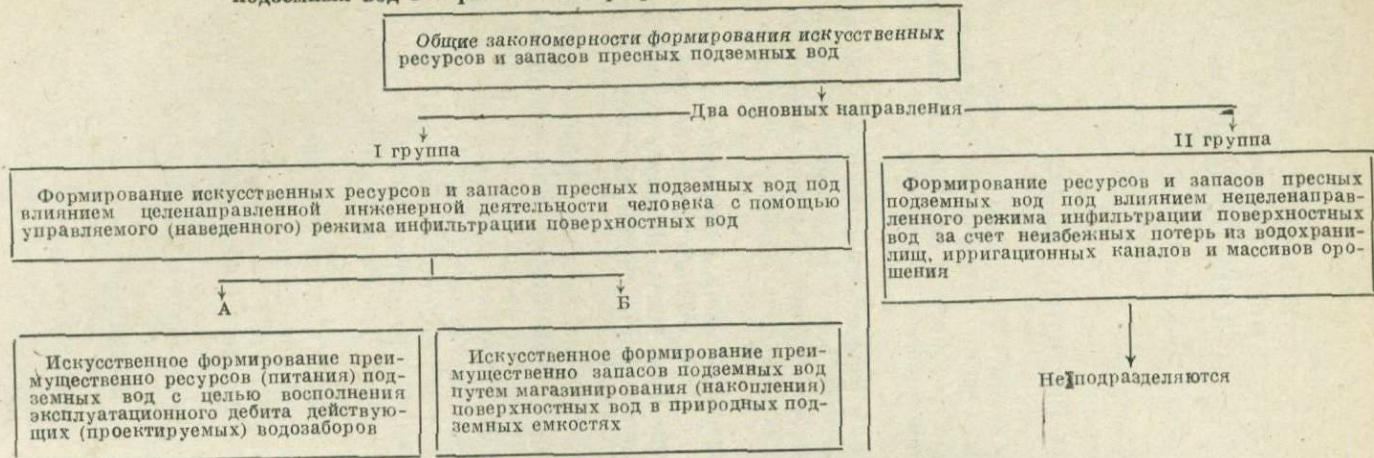
В связи с этим, целесообразно детально рассмотреть общие закономерности и некоторые особенности искусственного регулирования режима подземных вод среди большого разнообразия природных и искусственных факторов, оценить в систематизированном виде наиболее типичные условия (табл. 1).

Принятая типизация в той или иной мере отражает некоторые особенности искусственного формирования ресурсов и запасов подземных вод в природных емкостях верхней части гидросферы Земли.

При выделении перечисленных в табл. 1 типовых условий учитываются следующие основные признаки:

- 1) геологические условия и литологический состав горных пород зоны искусственного питания (зоны аэрации и зоны полного насыщения);
- 2) гидрогеологические условия искусственного формирования подземных вод;
- 3) режим фильтрации потока подземных вод при искусственном их восполнении;
- 4) граничные условия потока в плане и разрезе;
- 5) гидрологические и климатические условия.

Типизация гидрогеологических условий формирования искусственных ресурсов и запасов пресных подземных вод в верхней части разреза гидрогеосферы (по Н. И. Плотникову)



Типизация гидрогеологических условий формирования

Путем наведенной береговой инфильтрации поверхностных вод из реки, водохранилищ под влиянием эксплуатации каптажных сооружений с периодической рекультивацией закодматированного слоя рыхлых отложений	Путем двухсторонней наведенной береговой инфильтрации из реки, а также из специальных сооружений (бассейнов, траншей) или путем двухстороннего питания с помощью специальных инфильтрационных сооружений	Путем направленной периодической инфильтрации поверхностных вод и накопления их в подземных емкостях, с постоянным отбором системой водозаборных скважин (искусственное регулирование емкостных запасов подземных вод)	Путем нагнетания поверхностных вод системой буровых скважин в напорные или безнапорные горизонты с целью накопления емкостных (упругих) запасов (и их отбора с помощью каптажных сооружений)	Формирование в породах зоны аэрации ресурсов и запасов подземных вод в форме приканальных линз (искусственное месторождение подземных вод)	Формирование в породах зоны аэрации водоносного горизонта за счет инфильтрационных потерь из водохранилищ (искусственное месторождение подземных вод)	Формирование в породах зоны аэрации или полного насыщения ресурсов подземных вод за счет инфильтрации ирригационных вод на массивах орошения
--	--	--	--	--	---	--

Все эти основные признаки тесно взаимосвязаны, и подразделения их на типовые условия являются до некоторой степени условными, но необходимыми для практики.

Рассмотрим общую характеристику природных факторов, оказывающих влияние на формирования искусственных запасов подземных вод.

Гидрогеологические условия являются одним из важнейших факторов, определяющих формирование искусственного питания подземных вод.

Наиболее благоприятные гидрогеологические условия для искусственного восполнения могут быть выявлены в аллювиальных отложениях и в коренных породах речных долин, во флювиогляциальных отложениях, на площади конусов выноса и артезианских бассейнов. Во всех случаях для обоснования искусственного восполнения подземных вод необходимо на выбранном объекте достаточно детально изучить условия залегания и распространения подземных вод.

Для искусственного восполнения запасов грунтовых вод необходимо также изучить литологическое строение пород зоны аэрации и их гидрогеологические параметры. При выборе участков для искусственного восполнения грунтовых вод мощность зоны аэрации целесообразно подбирать по возможности не менее 3—5 м с целью получения благоприятных условий для улучшения качества воды.

Если при искусственном восполнении подземных вод имеется в виду создание регулировочных емкостных запасов, важное значение имеют большие мощности и площадь распространения водоносного горизонта, что проверяется предварительными расчетами в период поисковых работ.

Использование природных емкостей для регулирования запасов подземных вод решается для конкретных случаев на основе анализа гидрогеологических условий, а также путем технико-экономических расчетов.

Искусственное восполнение запасов грунтовых вод, приуроченных к трещиноватым или закарстованным породам, в том случае когда воды выходят на поверхность земли, происходит под влиянием процессов инфильтрации без улучшения качества воды. При таких условиях должно быть повышено требование к качеству подготовки сырой воды. В тех случаях, когда трещиноватые породы перекрываются сверху слоем песка мощностью не менее 5—10 м, искусственное восполнение подземных вод можно осуществить более эффективно.

Искусственное восполнение подземных вод более глубокого залегания (артезианские бассейны) производится путем устройства поглощающих скважин. При этом исходная вода должна быть достаточно хорошо очищена (в частности, содержание мути до 1—2 мг/л). В этом случае можно использовать водоносные пласты, приуроченные как к рыхлым, так к трещиноватым породам.

В условиях многолетней мерзлоты и холодного климата при оценке искусственного восполнения подземных вод существенное значение имеют тепловые расчеты, для которых необходимо получить дополнительные соответствующие тепло-физические параметры как водоносных, так и окружающих пород.

При оценке гидрогеологических условий следует анализировать также химический и газовый состав подземных вод в водоносном горизонте. При этом необходимо изучить возможные последствия смешивания воды источника восполнения с пластовыми водами.

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, и прежде всего в зоне интенсивной инфильтрации (Н. А. Плотников, 1940 г.).

К благоприятным условиям искусственного восполнения запасов грунтовых вод следует отнести: 1) залегание над водоносным горизонтом глинистых и слабопроницаемых пород с коэффициентом фильтрации менее 1—2 м/сут, мощностью более 5 м; 2) близкое к поверхности земли залегание уровня грунтовых вод (менее 2—3 м).

На участках действующих водозаборов для обоснования искусственного восполнения запасов подземных вод необходимо проанализировать гидрогеологические материалы и наблюдения за режимом подземных вод в условиях длительной эксплуатации.

Гидрологические условия не менее важны для оценки искусственного восполнения запасов подземных вод. В качестве источника искусственного восполнения наиболее часто применяются поверхностные воды — реки, водохранилища, озера. Для оценки источника восполнения необходимо знать режим поверхностных вод в течение года и в многолетнем разрезе (т. е. количественную характеристику), а также надежные данные, характеризующие качество воды.

Решающими являются данные по режиму поверхностного стока рек и мутности воды. Для оценки возможности отбора воды из озер и водохранилищ необходимо иметь данные по режиму (объему воды, режиму), а также характеристику санитарно-бактериологических условий.

Для районов Крайнего Севера и Сибири важно иметь данные, характеризующие условия промерзания рек и озер в зимнее время.

Климатические условия и их анализ являются важным природным фактором, определяющим технологическую схему восполнения запасов. Некоторые климатические элементы непосредственно, а другие косвенно влияют на работу сооружений искусственного восполнения запасов подземных вод и даже на выбор схемы такого восполнения. Важной особенностью метеорологических элементов является их изменчивость — сезонная (в течение года), а также многолетняя.

Рассмотрим влияние отдельных метеорологических элементов и климата в целом.

При искусственном питании подземных вод глубина инфильтрационных бассейнов в процессе максимального их наполнения составляет в среднем 1—3 м. При таких условиях в суровом климате Севера СССР или Сибири зимой открытые бассейны могут полностью промерзнуть. Поэтому инфильтрация из открытых бассейнов для искусственного восполнения запасов в суровых климатических условиях Севера СССР пока не применяется. По-видимому, применять инфильтрационные бассейны в таких условиях можно для сезонного (летнего) питания подмерзлотных подземных вод. В весьма редких случаях могут оказаться целесообразными специальные конструкции закрытых инфильтрационных бассейнов, а в некоторых условиях (для восполнения межмерзлотных вод) устройство поглощающих (инфильтрационных) скважин. 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 льдом покрывается только поверхность инфильтрационного бассейна без полного промерзания. При этом зимой инфильтрационные бассейны работают, но очистка бассейнов от ила с их опораживанием не делается, так как тогда песчаное дно промерзает.

Сезонные изменения температуры воздуха влекут за собой довольно значительные годовые колебания температуры воды поверхностных источников искусственного восполнения подземных вод (рек и озер) до 25° С и более. Колебание температуры же искусственно восполняемых подземных вод менее значительно — до 5° С, а иногда несколько больше. В отдельных случаях (данные В. В. Земляного и др.) колебания температуры подземных вод достигают 20° С, но это встречается очень редко.

В районах многолетней мерзлоты поверхностные воды в зимний период имеют температуру, близкую к нулю, а иногда совсем промерзают. Уменьшение температуры поверхностной воды следует учитывать при проектировании предварительной водоподготовки, а также очищающей способности инфильтрационных бассейнов. Кроме того, понижение 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.

ТИПИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Выше отмечалось, что в общих закономерностях формирования искусственных запасов подземных вод по определенным признакам можно выделить несколько типовых условий. Так, по характеру

направленности в общей проблеме четко определяются две группы, объединяющие различные типовые условия формирования искусственных ресурсов и запасов подземных вод (см. табл. 1). Первая группа объединяет такие разнообразные условия, в ко-

Канал

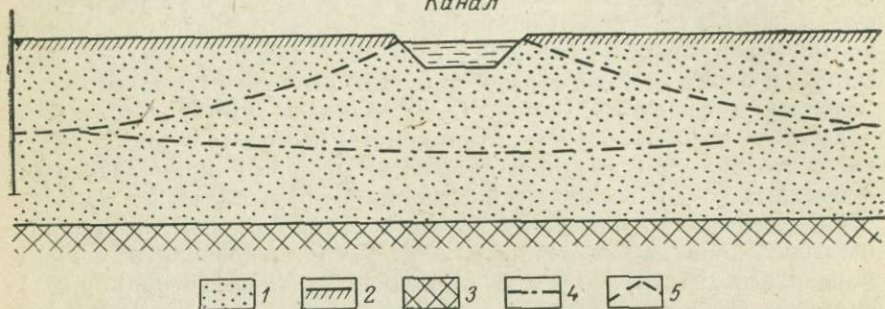


Рис. 6. Схема формирования приканальных линз пресных вод.

1 — водоносные пески; 2 — почвенный покров; 3 — водонепроницаемые породы; 4 — уровень соленых грунтовых вод (ниже уровня — соленые воды, выше — искусственно созданная линза пресных грунтовых вод); 5 — депрессия образования линзы пресных грунтовых вод

торых искусственные ресурсы и запасы формируются под влиянием целенаправленной деятельности человека, т. е. в условиях управляемого или наведенного режима инфильтрации в определенных границах, например, непосредственно на участке действующего водозабора, либо на новой площади будущего водозабора. В других случаях искусственные запасы подземных вод могут формироваться в таких условиях, когда такого целенаправленного режима нет. Например, при эксплуатации сравнительно крупных ирригационно-обводнительных и транспортных каналов за счет неизбежных инфильтрационных потерь (через дно и откосы канала) в породах зоны аэрации всегда формируются так называемые приканальные линзы пресных вод (рис. 6). Причем в некоторых случаях в приканальной зоне полного насыщения, в естественных условиях могут быть распространены соленые подземные воды. Тогда под каналами искусственно формируются так называемые «плавающие линзы» пресных подземных вод.

Такие условия формирования — «плавающих приканальных линз» — часто наблюдаются в орошаемых районах Среднеазиатских республик, на Северном Кавказе, на юге Украины, что, очевидно, характерно вообще для аридной зоны СССР.

Нецеленаправленные формирования искусственных запасов подземных вод наблюдаются также в процессе эксплуатации крупных равнинных водохранилищ, на площади подпора которых за счет неизбежных инфильтрационных потерь в чаше водохранилища и его бортах происходит накопление подземных вод в породах зоны аэрации (рис. 7).

Наиболее благоприятные геологические условия в этом отно-

шении отмечаются на площадях водохранилищ на реках Днепр, Дон, Волга, Сыр-Дарья и др.

Причем в некоторых случаях в бортах водохранилищ наблюдаются довольно значительные инфильтрационные потери и в во-

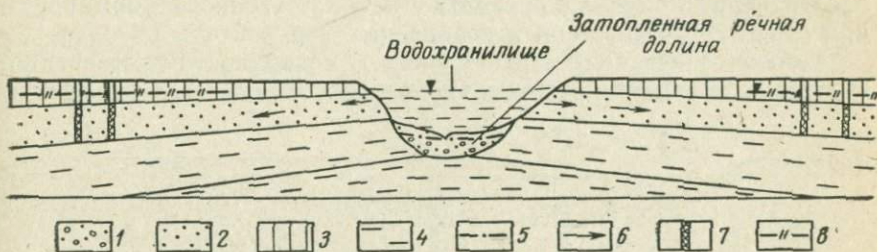


Рис. 7. Условия искусственного формирования слабонапорных пресных подземных вод под влиянием инфильтрационных потерь из водохранилища.

1 — аллювиальные галечники, водоносные; 2 — пески, в которых искусственно сформировался слабонапорный водоносный горизонт под влиянием береговой инфильтрации поверхностных вод из водохранилища; 3 — покровные суглинки; 4 — водопроницаемые породы; 5 — уровень грунтовых вод аллювиальных галечников до затопления; 6 — направление береговой инфильтрации поверхностных вод водохранилища; 7 — водозаборные скважины; 8 — пьезометрический уровень искусственно сформированных слабонапорных подземных вод

допроницаемых породах на прилегающих территориях искусственно формируются довольно мощные, по существу новые водоносные горизонты с крупными эксплуатационными запасами.

Условия формирования искусственных ресурсов и запасов подземных вод первой группы

Управление инфильтрационным питанием с целью создания искусственных ресурсов и запасов подземных вод может быть осуществлено в двух основных направлениях:

а) непосредственно на участке действующих водозаборных сооружений;

б) на новых участках, где каптажные сооружения отсутствуют и в дальнейшем возникает необходимость в их создании.

Как показывает опыт Советского Союза и зарубежных стран, наиболее экономически целесообразным является целенаправленное искусственное питание по первому направлению исследований. Эта экономическая целесообразность определяется следующими очень важными факторами:

а) наличием действующего водозаборного сооружения и объекта водопотребителя;

б) достаточно детальным изучением гидрогеологических условий участка искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов;

в) накопленным опытом эксплуатации подземных вод.

По второму направлению осуществление проекта искусственного формирования запасов подземных вод осложняется тем, что

в процессе изысканий приходится решать по существу две задачи: разведывать подземную емкость для накопления запасов подземных вод, и собственно водозаборный участок для их каптажа.

В практике СССР и зарубежных стран наиболее широкое распространение получила организация искусственного формирования запасов в безнапорных водоносных горизонтах.

Близкое залегание грунтовых вод от поверхностных, особенно в речных долинах, сравнительно широкое их распространение,

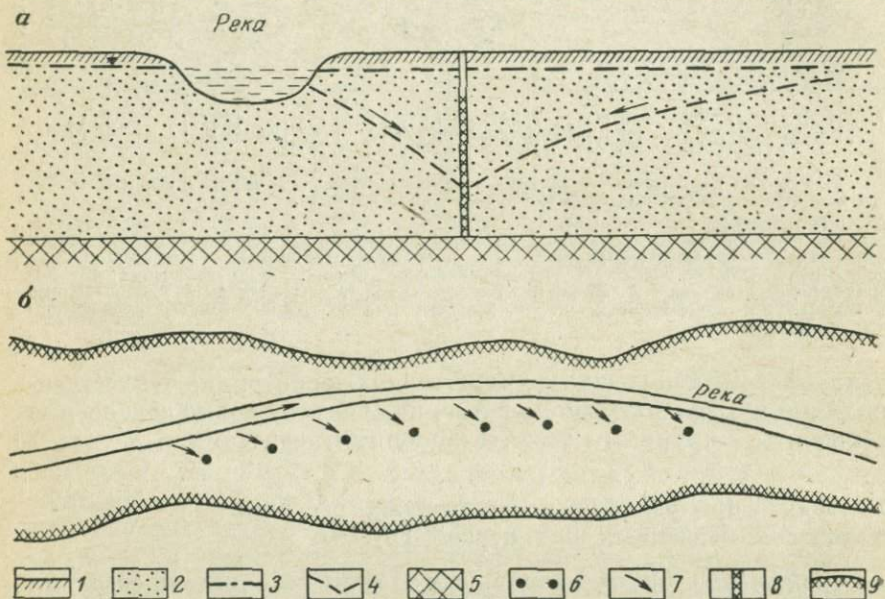


Рис. 8. Схема направленного усиленного питания водозаборных скважин за счет береговой инфильтрации речных вод.

а — разрез; б — план. 1 — почвенный слой; 2 — водоносные пески; 3 — уровень грунтовых вод до эксплуатаций; 4 — депрессионная воронка; 5 — водонепроницаемые породы; 6 — буровые скважины инфильтрационного водозабора; 7 — направление береговой инфильтрации; 8 — фильтр водозаборной скважины; 9 — контур речной долины

прямая гидравлическая связь с поверхностными водами и другие природные факторы, о которых было отмечено выше, создали благоприятные предпосылки для формирования искусственных их ресурсов и запасов.

Как видно из табл. 1, в первой группе можно выделить две подгруппы.

Первая подгруппа, объединяющая два типа, рассматривает воспроизводство эксплуатационных запасов подземных вод непосредственно на действующих или строящихся водозаборных сооружениях путем целенаправленного (или наведенного) искусственного питания за счет поверхностных вод.

При этом на водозаборном участке на площади депрессионной воронки по существу происходит искусственное формирование преимущественно ресурсов подземных вод:

а) либо под влиянием работы самого каптажного сооружения за счет вызванной береговой инфильтрации поверхностных вод (например, на участке береговых инфильтрационных водозаборов);

б) либо под влиянием специально созданных инженерных сооружений за счет инфильтрации из них поверхностных вод (рис. 8, 9). В частично осушенной части водоносного горизонта искусственно созданные ресурсы являются основным источником

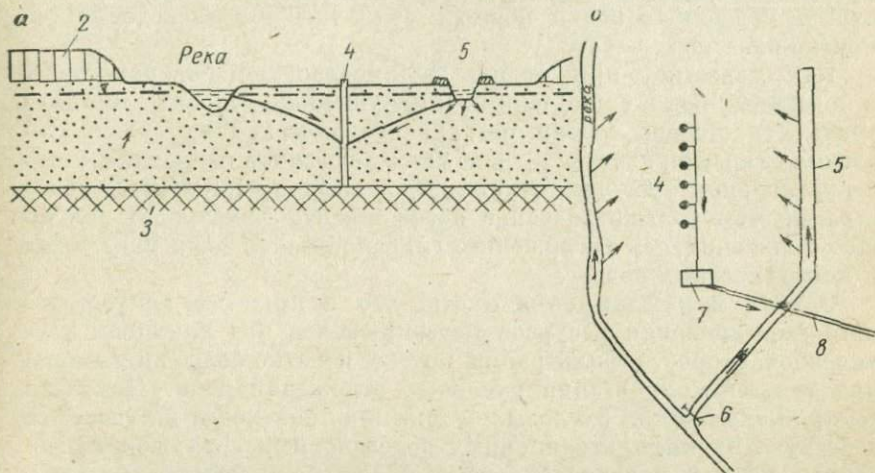


Рис. 9. Схема двухстороннего питания водозабора.

a — разрез; *b* — план. 1 — водоносные породы; 2 — покровные суглинки; 3 — водонепроницаемые породы; 4 — водозаборное сооружение; 5 — инфильтрационный бассейн; 6 — головное сооружение; 7 — насосная станция; 8 — трасса водовода. Стрелками показано направление береговой инфильтрации

питания эксплуатационных выработок (буровых скважин или каптажных галерей).

Таким образом, в данном случае инженерная деятельность направлена на управление водными ресурсами, на целенаправленное комплексное их использование.

Наиболее благоприятным для формирования дебита водозабора является двухстороннее искусственное питание. Такая схема искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод на действующих водозаборах применяется главным образом в двух случаях:

а) мощность водопроницаемых пород в речной долине незначительна (порядка 8—12 м) и для повышения производительности инфильтрационного водозабора невозможно создать большие понижения уровня воды в эксплуатационных скважинах;

б) снижение дебита инфильтрационного водозабора происходит за счет кольматации русловых отложений реки, для повышения производительности скважин требуется создать дополнительное искусственное питание.

Такая схема гидрогеологических условий формирования искусственных запасов отнесена нами ко второму типу.

В рассматриваемом направлении искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод большую роль играют процессы кольматации русловых отложений реки или фильтрующего слоя в инфильтрационных сооружениях, а также процессы образования илистой пленки. Во многих случаях эти процессы определяют условия искусственного формирования ресурсов подземных вод и периодически требуют проведения ремонтно-очистных работ.

Как известно, при оценке взаимодействия поверхностных и подземных вод в естественных и нарушенных условиях принято учитывать степень совершенства гидравлической их связи. Последняя характеризуется прежде всего величиной гидравлического сопротивления русловых отложений, их водопроницаемыми свойствами. Чем больше значение коэффициента фильтрации русловых отложений, тем совершеннее гидравлическая связь подземных и поверхностных вод.

Однако необходимо учитывать, что в процессе искусственного формирования ресурсов подземных вод под влиянием увеличенной скорости фильтрации потока нередко более интенсивно проявляется кольматация русловых отложений реки. Наиболее быстро кольматация русловых отложений происходит на участках действующих инфильтрационных водозаборных сооружений, где речные воды в паводковое время имеют повышенную мутность и несут большой твердый сток.

Исследованиями на некоторых водозаборах было установлено, что закольматированный слой песчано-галечниковых аллювиальных отложений достигает иногда мощности 6—8 м и более. При таких условиях вести борьбу с кольматацией путем периодической рекультивации русловых отложений практически невозможно. В этом случае целесообразнее всего создавать на площади водозаборного участка с помощью ограждающих дамб отстойники и инфильтрационные бассейны для искусственного двухстороннего питания эксплуатационных скважин.

Процесс кольматации русловых отложений значительно снижает эффективность искусственного питания водозаборных скважин. В связи с этим очень важно своевременно изучить гидрологическую и физико-химическую характеристики выбранного источника питания и своевременно разработать технологическую схему искусственного формирования подземных вод.

Однако, не всегда на участках инфильтрационных водозаборов интенсивно проявляется процесс кольматации русловых отложений. Так, например, инфильтрационные водозаборы, устроенные на р. Енисей для водоснабжения г. Красноярск, больше чем за 30 лет эксплуатации не снижают своей производительности. Воды Енисея, как и многих других рек Сибири, являются осветленными, практически не повышают мутности в весеннее половодье, что

несомненно является весьма благоприятным условием для эксплуатации инфильтрационных водозаборов и формирования искусственного их питания.

В практике Советского Союза известны другие, не менее благоприятные гидрогеологические условия искусственного формирования эксплуатационных запасов подземных вод на участке

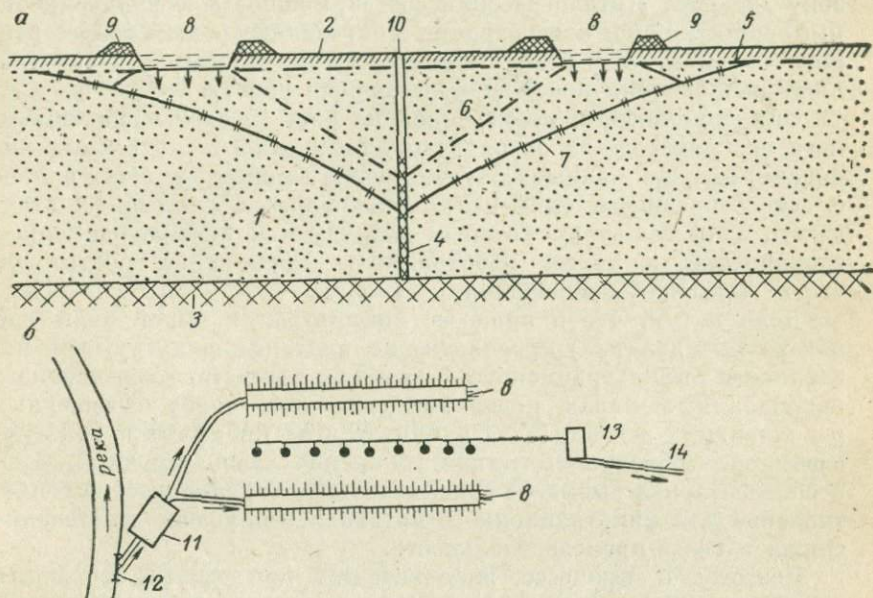


Рис. 10. Схема двухстороннего искусственного питания водозабора.

а — разрез; б — план. 1 — водоносные пески; 2 — почвенный слой; 3 — водонепроницаемые породы; 4 — фильтр водозаборной скважины; 5 — уровень грунтовых вод до эксплуатации; 6 — депрессионная воронка до искусственного воспроизводства запасов; 7 — депрессионная воронка после искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод; 8 — инфильтрационные траншеи (бассейны); 9 — дамба бассейна; 10 — водозаборные скважины; 11 — очистные сооружения; 12 — головные сооружения; 13 — насосная станция второго подъема; 14 — напорный водовод. Стрелками на разрезе показано направление инфильтрации

действующих водозаборов. На рис. 10 представлена схема двухстороннего искусственного питания водозабора, расположенного не в речной долине, а на некотором удалении от нее. При таких условиях экономически выгодно с помощью специальных сооружений подать предварительно подготовленные речные воды к инфильтрационным сооружениям для искусственного питания эксплуатационных скважин с целью увеличения их производительности.

На приведенной принципиальной схеме показаны два инфильтрационных бассейна. В случае необходимости для обеспечения заданной производительности скважин на водозаборном участке может быть построено большое число бассейнов искус-

венного питания, как это практикуется, например, в водоснабжении Прибалтийских республик.

В гидрогеологическом отношении отличительная особенность условий формирования искусственных запасов подземных вод в данном случае состоит в том, что дополнительное питание водоносного горизонта происходит через горные породы, слагающие зону аэрации. Литологический состав, мощность и фильтрационные свойства пород зоны аэрации и определяют режим искусственного питания. Эти условия искусственного питания и определяют направления поисково-разведочных работ.

Опыт применения приведенной на рис. 10 схемы искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод показывает, что в данных случаях очень важным является вопрос целесообразности применения оптимального состава фильтрующего слоя (фильтра), которым оборудуются инфильтрационные сооружения, а также необходимость тщательной подготовки сырой воды для поглощения.

Дело в том, что в процессе инфильтрации сырой воды (как и в речных долинах) происходит коагуляция фильтрующей поверхности инфильтрационных бассейнов, вследствие постепенного накопления в порах поверхностного слоя пород взвешенных и коллоидных веществ. Под влиянием этих процессов в фильтрующем слое образуется глинистая пленка толщиной до 2—3 см и более. Пленка вызывает дополнительное гидравлическое сопротивление для фильтрационного потока и сооружение постепенно снижает свою производительность.

Поэтому в процессе эксплуатации приходится, соблюдая очередность, отключать инфильтрационные сооружения из схемы питания и производить различными способами (ручным или гидромеханическим) рекультивацию фильтрующего слоя с целью восстановления его водопроницаемых свойств. В связи с этим на водозаборных участках всегда сооружаются резервные инфильтрационные бассейны с тем, чтобы не нарушать общего режима искусственного питания эксплуатационных скважин.

Благоприятные гидрогеологические условия формирования искусственных ресурсов подземных вод, за счет которых можно обеспечить постоянное питание водозаборных скважин, могут быть также созданы путем сооружения в речных долинах небольших водохранилища годичного накопления (рис. 11).

Как правило, в речных долинах аллювиальные образования обладают хорошими фильтрационными свойствами, а в верхней части чаши водохранилища можно создать условия для отстоя из воды взвешенных частиц и, вообще, твердого стока.

Водозаборное сооружение инфильтрационного типа, состоящее из системы взаимодействующих скважин, устраивается со стороны нижнего бьефа водохранилища. При этом вододерживающая плотина на водохранилище строится с учетом фильтрационных потерь. Постоянное питание водозаборных скважин происходит

за счет береговой и донной фильтрации поверхностных вод из водохранилища.

Описанная схема также может быть отнесена ко второму типу искусственного формирования подземных вод.

Опыт эксплуатации такого типа водозаборного сооружения на искусственном питании (например, в Центральном Казахстане), устроенного для водоснабжения г. Караганды, показал высокую эффективность и бесперебойную работу эксплуатационных скважин. Наряду с фильтрационными потерями пополнение ресурсов грунтовых вод на этом водозаборе осуществляется периодическим затоплением части площади депрессионной воронки.

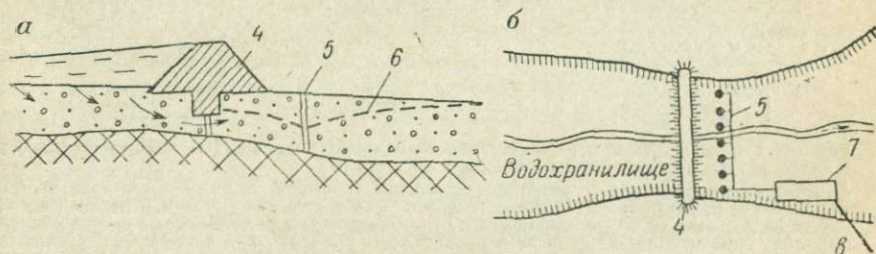


Рис. 11. Схема искусственного питания водозаборных скважин.

а — разрез; б — план. 1 — водоносные песчано-галечниковые отложения; 2 — водонепроницаемые породы; 3 — контур речной долины; 4 — плотина; 5 — водозаборные скважины; 6 — депрессионная воронка; 7 — насосная станция; 8 — напорный водовод

За последнее время в Советском Союзе в энергетических целях было построено несколько крупных инфильтрационных водозаборов в прибрежных частях равнинных водохранилищ на Волге, Днепре, Доне, Оби и др. Строительство равнинных водохранилищ позволило успешно решить проблемы водоснабжения ряда крупных городов: Академгородка (в Новосибирске), Тольятти, Иркутска и др.

В заключение общей характеристики гидрогеологических условий формирования искусственных ресурсов подземных вод первого и второго типов целесообразно еще раз напомнить об оценке степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод. Этот вопрос, как видно из вышеизложенного, является одним из основных в рассматриваемой проблеме.

Из общей теории известны весьма разнообразные формы взаимосвязи поверхностных и подземных вод, довольно подробно рассмотренные в ряде опубликованных работ (Б. И. Куделин, 1960 г., и др.). Характеристика этих форм взаимосвязи приводится главным образом для выбора способов расчленения годового и многолетнего гидрографа рек.

Для оценки гидрогеологических условий формирования искусственных ресурсов подземных вод рассмотрим наиболее характерные схемы (рис. 12 и 13).

На рис. 12 приведены две схемы, характеризующие наиболее распространенные формы гидравлической связи подземных и поверхностных вод. В одном случае эта связь проявляется весьма совершенно, так как водовмещающие породы обладают хорошими фильтрационными свойствами (рис. 12, а). Как видно из схемы, в разрезе аллювиальных отложений реки отсутствует закольматированный слой русловых отложений. Фильтрационные свойства

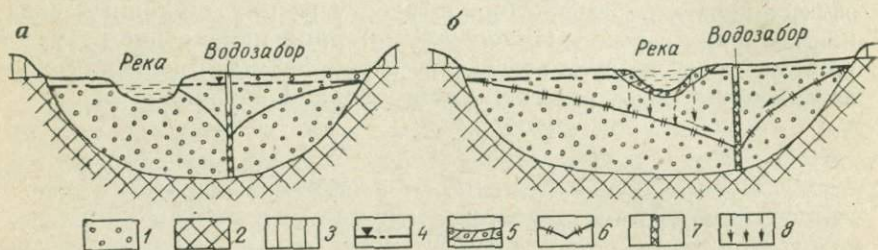


Рис. 12. Характеристика форм гидравлической связи подземных и поверхностных вод в естественных и нарушенных условиях:

а — питания водо-забора в условиях подпертой береговой инфильтрации (без отрыва депрессии от русла реки); б — питания водо-забора в условиях свободной береговой и донной инфильтрации (с отрывом депрессии от русла реки). 1 — водоносные песчано-галечниковые образования; 2 — водонепроницаемые породы; 3 — покровные суглинки; 4 — уровень грунтовых вод в естественном залегании; 5 — русловые, закольматированные отложения; 6 — депрессионная воронка; 7 — фильтр скважины; 8 — питание в форме дождевания

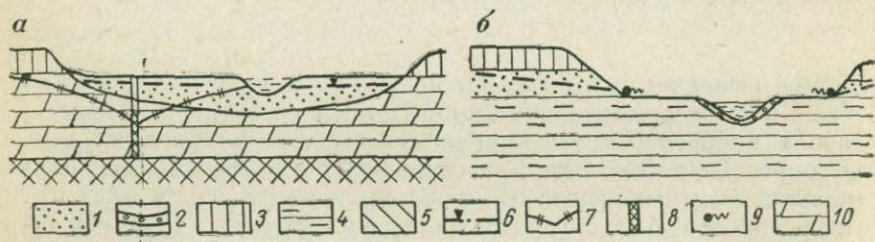


Рис. 13. Характеристика взаимоотношений подземных и поверхностных вод:

а — гидравлическая связь подземных и поверхностных вод в условиях двухслойной среды; б — гидравлическая связь отсутствует. 1 — водоносные породы; 2 — русловые современные отложения; 3 — покровные суглинки; 4 — слабопроницаемые мергели; 5 — водонепроницаемые породы; 6 — уровень грунтовых вод; 7 — депрессионная воронка; 8 — фильтр скважины; 9 — родники; 10 — водоносные известняки

песчано-галечниковых образований характеризуются относительной однородностью на всю их мощность.

При таких гидрогеологических условиях в процессе эксплуатации водозаборных скважин дебит их будет формироваться преимущественно за счет искусственно вызванной береговой инфильтрации поверхностных вод. Депрессионная воронка сниженных уровней подземных вод вокруг водозабора будет распространяться в сторону реки до современного русла и дальше развиваться не будет. В связи с этим, на водозаборном участке очень

быстро установится стационарный режим фильтрации потока. Формирование дебита эксплуатационных скважин будет происходить в условиях подпертого режима фильтрации, а постоянно действующий водоток реки можно рассматривать в расчетных схемах при оценке эксплуатационных запасов как зону постоянного напора.

Такие гидрогеологические условия взаимосвязи подземных вод с поверхностными являются весьма благоприятными для формирования искусственных запасов на участках инфильтрационных водозаборов. Однако, как отмечалось выше, за счет искусственно вызванной кольматации аллювиальных отложений современного русла реки, а также за счет образования илистой пленки в процессе эксплуатации подземных вод может возрасти гидравлическое сопротивление, что обычно приводит к снижению общей производительности водозабора. Для восстановления дебита водозаборных скважин (обычно периодически) применяют различные способы рекультивации русловых отложений. В некоторых случаях бурная деятельность паводковых потоков реки размывает ранее образовавшийся закольматированный слой и илистую пленку, и, таким образом, в естественных условиях происходит восстановление фильтрационных свойств песчано-галечниковых отложений.

Таким образом, в зависимости от гидрологического режима реки восстановление фильтрационных свойств верхней части разреза аллювиальных образований может быть осуществлено в естественных условиях или с помощью специальных мероприятий.

Подпертый режим фильтрации возмущенного потока подземных вод может быть выявлен и при двухслойном строении речной долины, как это показано на рис. 13, а. Аллювиальные песчано-галечниковые отложения, хорошо гидравлически связанные с поверхностными водами реки, в данном случае могут играть роль регулятора подземного стока, искусственно направленного к каптажному сооружению под влиянием эксплуатации водозаборных скважин.

Описанные гидрогеологические условия должны учитываться при проектировании поисково-разведочных работ с целью обоснования искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод на проектируемых и действующих водозаборах.

На рис. 12, б рассмотрена несколько иная форма гидравлической связи подземных и поверхностных вод, которая формируется в нарушенных условиях режима фильтрационного потока. В данном примере в разрезе рыхлых образований реки четко выражен слой русловых отложений, фильтрационные свойства которых хуже, чем собственно аллювиальных песчано-галечниковых образований (нередко на 1—2 порядка). Этот слой русловых отложений может образоваться в результате естественной

кольматации пород под влиянием значительной мутности поверхностных вод.

Таким образом, в естественных условиях русловые отложения реки могут обусловить дополнительное гидравлическое сопротивление потока. Оно четко может быть зафиксировано в процессе наблюдений за режимом поверхностных и подземных вод (изменения уровня подземных вод будут отставать во времени от режима уровня поверхностных вод).

Работа водозабора в такой гидрогеологической обстановке будет иметь иной фильтрационный режим. Депрессионная воронка на водозаборном участке, развиваясь в сторону реки, «оторвется» от современного русла. Искусственное питание эксплуатационных скважин при этом будет проходить в условиях свободной фильтрации потока в виде дождевания.

На рис. 13, б представлен схематический гидрогеологический разрез речной долины, в которой эрозионная деятельность поверхностных вод полностью вскрыла всю мощность водоносного горизонта. Надпойменная и пойменная террасы в данном случае сложены слабоводопроницаемыми породами, ресурсы подземных вод которых не имеют практического значения.

В таких условиях гидравлическая связь между поверхностными и подземными водами фактически отсутствует. Отсутствуют в связи с этим благоприятные условия и для формирования искусственных запасов подземных вод.

В главе XI приводятся приближенные аналитические решения, позволяющие оценить условия взаимосвязи поверхностных и подземных вод и выбрать для оценки запасов необходимую фильтрационную схему.

Вторая подгруппа в гидрогеологическом отношении характеризуется тем, что инженерные мероприятия направлены на искусственное образование в верхней части гидрогеологического разреза преимущественно запасов подземных вод с постоянным или периодическим направленным питанием за счет инфильтрации поверхностных вод (см. табл. 1). Такие условия позволяют искусственно регулировать формирование и отбор емкостных запасов подземных вод (рис. 14).

Искусственное воспроизводство эксплуатационных запасов подземных вод по этой схеме целесообразно производить в речной долине, где имеется необходимая мощность водопроницаемых песчано-галечниковых аллювиальных образований, позволяющая создавать большие понижения уровня подземных вод в водозаборных скважинах с последующим возобновлением сработанных емкостных запасов. Большая мощность водопроницаемых пород необходима как регулировочная емкость для периодической сработки и последующего накопления запасов подземных вод под влиянием непрерывного отбора и разовой инфильтрации поверхностных вод.

Как показывает опыт, искусственное питание сработанных

запасов подземных вод можно осуществить в паводковое время путем периодического затопления площади осушенных пород поверхностными водами под защитой водоудерживающих земляных дамб. Площадная инфильтрация в таких благоприятных условиях происходит очень быстро, и ранее сработанные емкостные

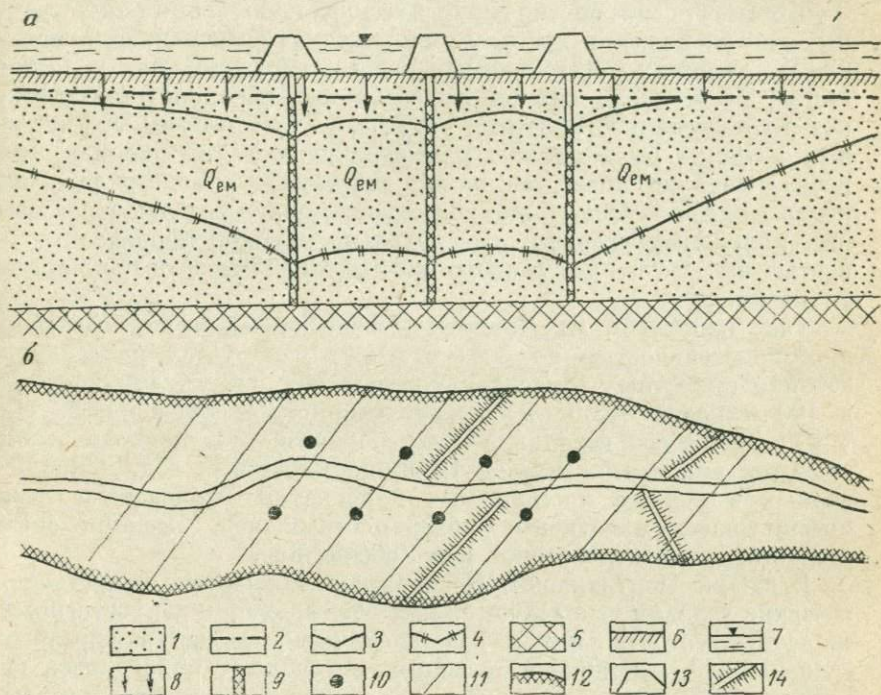


Рис. 14. Схема искусственного формирования запасов подземных вод.

а — разрез; б — план. 1 — водоносные пески, галечники; 2 — уровень грунтовых вод до эксплуатации; 3 — депрессионная воронка при паводковом питании; 4 — депрессионная воронка на минимальные положения (при отсутствии питания); 5 — водонепроницаемые породы; 6 — почвенный покров; 7 — горизонт паводковых вод реки; 8 — направление инфильтрации паводковых вод; 9 — фильтр водозаборных скважин; 10 — буровые скважины площадного водозабора; 11 — затопляемая паводковыми водами площадь речной долины; 12 — контур речной долины; 13 — защитный оголовок буровых скважин; 14 — водоудерживающая дамба; $Q_{ем}$ — периодически отбираемые емкостные запасы грунтовых вод

запасы полностью возобновляются, несмотря на непрерывность работы водозабора с заданной производительностью.

Таким способом можно искусственно создавать и регулировать отбор емкостных запасов подземных вод в современных речных долинах, не имеющих постоянно действующих поверхностных потоков. Весенние потоки действуют короткое время (2—3 месяца в году) и могут служить надежным источником воспроизводства запасов подземных вод при наличии необходимой подземной емкости (мощности водопроницаемых пород).

Такие условия могут быть выявлены и в районах Крайнего Севера и Сибири, где искусственное накопление емкостных запасов подземных вод можно осуществить в речных долинах, в которых поверхностные воды после зимнего промерзания действуют 5—6 месяцев в году.

Таким образом, способ периодического накопления искусственных запасов подземных вод путем площадной инфильтрации паводковых, весенних поверхностных вод в речных долинах с постоянным их отбором системой водозаборных скважин (искусственное регулирование емкостных запасов) является очень эффективным и может быть широко применен даже в тех районах, где речная сеть не имеет постоянно действующих водотоков. Как показывает практика, такие водозаборы можно создать в различных природных условиях и с довольно высокой производительностью на базе искусственного накопления запасов в природных емкостях.

Так, например, на Крайнем Севере такого типа водозабор производительностью до 80 тыс. м³/сут базируется на использовании емкостных запасов грунтовых вод, аккумулирующихся в 100-метровой толще песчано-галечниковых образований. На Урале действуют несколько водозаборов за счет периодической сработки емкостных запасов трещинно-карстовых вод, накапливаемых в хорошо проницаемых карбонатных породах за счет инфильтрации паводковых поверхностных вод. Имеется опыт создания таких водозаборов и в Узбекистане.

В районе Центрального Казахстана аналогичные гидрогеологические условия используются для формирования искусственных запасов грунтовых вод в аллювиальных отложениях древних речных долин. Мощность песчаных водоносных пород здесь не велика — 20—30 м, но отмечается значительная площадь их распространения в широких по фронту древних долинах — до нескольких десятков километров (древняя долина Джон, Сары-Су и др.). При таких условиях для более эффективной сработки емкостных запасов грунтовых вод целесообразно строить площадные водозаборы (рис. 15).

В практике зарубежного опыта известны примеры искусственного регулирования поверхностного речного стока системой мелких водохранилищ с целью создания благоприятных условий площадной инфильтрации и аккумуляции подземного стока в песчано-галечниковых образованиях (рис. 16). Инфильтрационный водозабор при такой схеме искусственного формирования емкостных запасов грунтовых вод устраивается со стороны нижнего бьефа плотины.

Целесообразно использовать этот опыт регулирования и трансформации поверхностного стока, например, в условиях Черноморского побережья. На территории побережья при сравнительно густой речной сети в весеннее время формируются бурные поверхностные потоки, безвозвратно стекающие в Черное море.

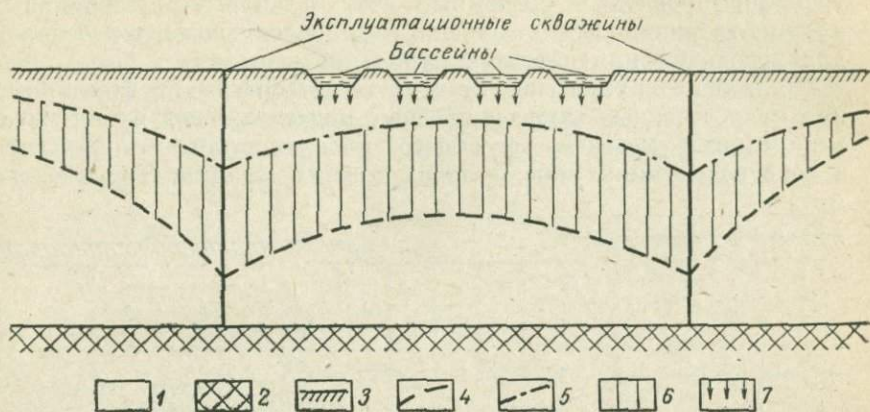


Рис. 15. Схема периодического искусственного питания подаемых вод на водозаборном участке.

1 — водоносные породы; 2 — водонепроницаемые породы; 3 — почвенный покров; 4 — минимальное положение депрессионной воронки; 5 — максимальное положение депрессионной воронки; 6 — периодически сбрасываемые запасы подземных вод; 7 — направление фильтрации потока со стороны инфильтрационных бассейнов

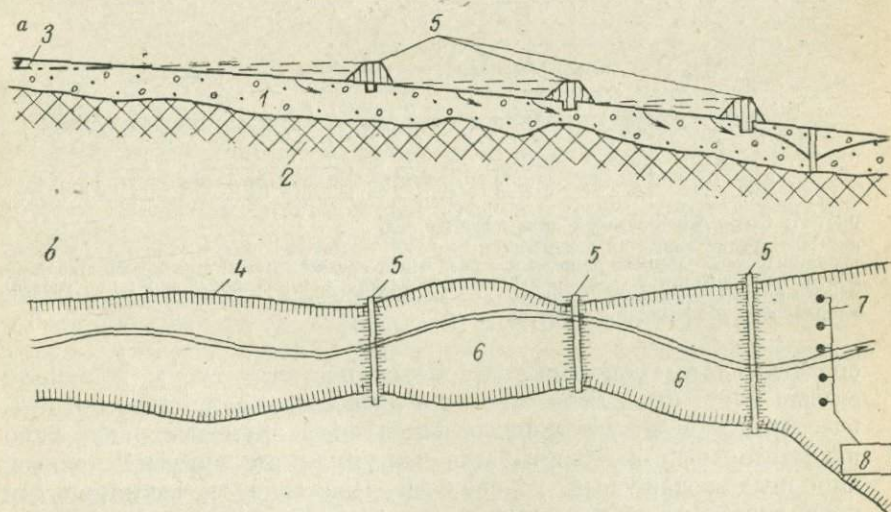


Рис. 16. Схема искусственного формирования ресурсов и запасов подземных вод с помощью каскада мелких водохранилищ.

а — разрез; б — план; 1 — водоносные песчано-галечниковые отложения; 2 — водонепроницаемые породы; 3 — уровень грунтовых вод; 4 — контур речной долины; 5 — водоудерживающие плотины; 6 — водохранилища; 7 — водозаборные сооружения; 8 — насосная станция второго подъема. Стрелками показано направление подземного стока

Каскадом набросных мелких плотин вполне возможно искусственно удлинить время пробегания весенних потоков и, частично, трансформировать в подземный сток в толщу аллювиальных песчано-галечниковых отложений, с последующим их отбором для водоснабжения объектов курортной зоны.

К этой подгруппе следует отнести четвертый тип формирования искусственных запасов пресных подземных вод путем magazинирования местного весеннего поверхностного стока либо в зоне насыщения, либо в породах зоны аэрации. Технические

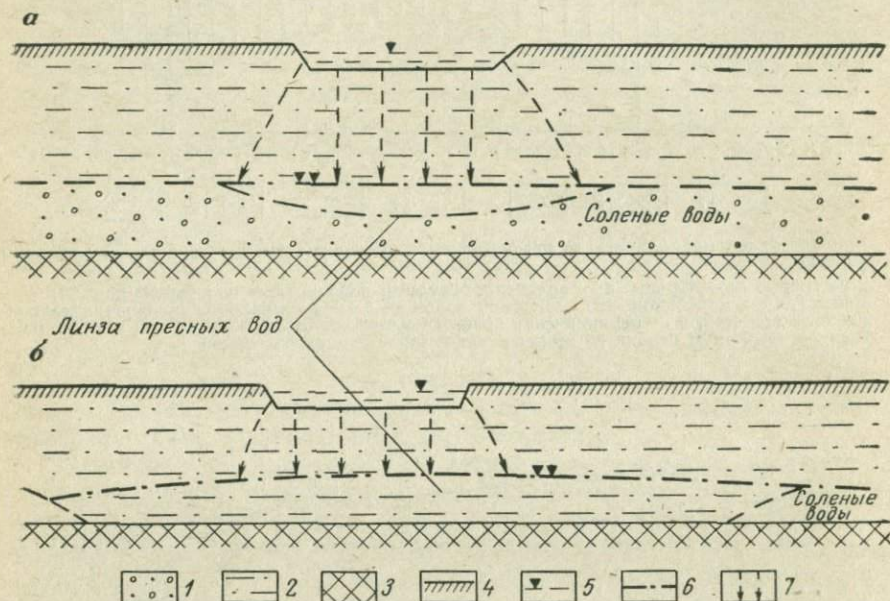


Рис. 17. Схема формирования линз пресных вод.

а — плавающие линзы на поверхности соленых подземных вод; б — линза в породах аэрации. 1 — водоносные породы, насыщенные солеными водами; 2 — водопроницаемые породы зоны аэрации; 3 — водопроницаемые породы; 4 — почвенный слой; 5 — уровень воды в инфильтрационном бассейне; 6 — уровень и контуры линзы пресных вод; 7 — направления инфильтрационного питания

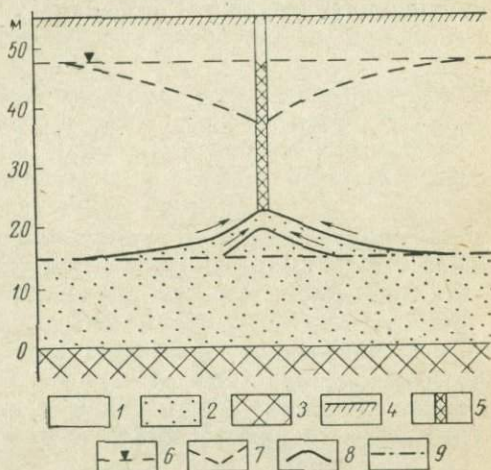
средства для трансформации поверхностного стока в данном случае могут быть либо открытые инфильтрационные котлованы, бассейны для искусственного накопления грунтовых вод, либо нагнетательные скважины для аккумуляции упругих запасов напорных водоносных горизонтов. Практика magazинирования поверхностного стока в подземных емкостях в Советском Союзе имеет мало примеров. В этом направлении были успешно проведены экспериментальные работы в производственных масштабах на нескольких объектах.

Рассматривая условия искусственного формирования линз пресных вод, можно наметить две схемы в зависимости от гидрогеологических условий выбранного объекта и режима питания

(рис. 17). Когда в разрезе выбранного объекта залегает довольно мощный водоносный горизонт соленых подземных вод, искусственное питание линзы со стороны инфильтрационного бассейна очень быстро достигнет уровня соленых вод. Вначале произойдет накопление пресных вод в виде бугра, выпуклая сторона которого обращена кверху. Затем после прекращения питания пресная вода постепенно будет растекаться по границе раздела в форме плавающей линзы. При возобновлении искусственного питания этот процесс формирования будет протекать в том же направлении.

Рис. 18. Схема внедрения соленых вод в несовершенную скважину, пробуренную в горизонте пресных вод.

1 — горизонт пресных грунтовых вод; 2 — горизонт соленых подземных вод; 3 — водонепроницаемые породы; 4 — почвенный покров; 5 — фильтр скважины; 6 — статический уровень грунтовых вод; 7 — депрессионная воронка при откачке; 8 — контур бугра соленых вод во время откачки; 9 — естественная граница раздела пресных и соленых вод.



Условия эксплуатации запасов пресных подземных вод плавающей линзы являются очень сложными. При эксплуатации будет происходить подтягивание контура соленых вод к водозаборным скважинам и возможный прорыв вод повышенной минерализации может ухудшить качество пресных вод (рис. 18). Поэтому при эксплуатации водозабора всегда требуется тщательное проведение режимных наблюдений, строгая регламентация режима работы каптажного сооружения. В некоторых случаях для обеспечения качества пресных вод приходится сооружать спаренный водозабор. Аналитические расчеты для решения перечисленных задач приведены в главе XI.

Когда в верхней части гидрогеологического разреза распространен маломощный водоносный горизонт соленых вод и имеется сравнительно большая мощность горных пород зоны аэрации, искусственное формирование линзы может происходить в несколько иных условиях. При искусственном питании пресные воды могут достигнуть непосредственно водоупорных пород, оттесняя постепенно соленые воды на фланги. После этого при дальнейшем питании линза будет формироваться в горизонтальном направлении (см. рис. 17, б). При продолжительном питании таким путем можно накопить довольно большие запасы пресных вод.

Гидрогеологические условия эксплуатации линзы пресных вод, залегающих непосредственно на водоупорных породах, будут несколько предпочтительней по сравнению с предыдущими. В данном случае подтачивания контура соленых вод при эксплуатации водозаборных скважин можно ожидать только со стороны боковых границ.

Выше отмечалось, что в Советском Союзе в части magazинирования поверхностного стока в подземных емкостях были проведены только опытные натурные исследования на территории Туркмении (Глазунов, Роговская, 1968, и др.).

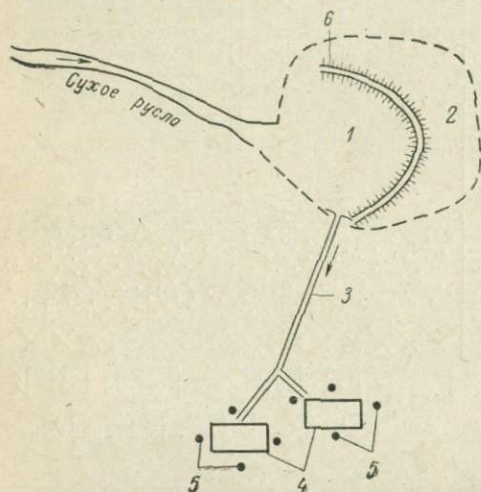


Рис. 19. Схема опытной установки формирования плавающей линзы пресных вод в песках Западной Туркмении.

1 — отстойник весенних вод на площади кыра 2; 3 — водовод; 4 — инфильтрационные котлованы; 5 — наблюдательные буровые скважины; 6 — направляющая земляная дамба

Для проведения опытных работ был выбран разведочный полигон в районе Западно-Туркменской низменности, где сравнительно широко распространены, так называемые, такырные участки с местным весенним поверхностным стоком. На опытном полигоне были пробурены поисково-разведочные, а затем наблюдательные скважины, а также выполнен комплекс примитивных инженерных сооружений для задержания весеннего стока.

Мощность пород зоны аэрации на участке составляла 4—6 м, ниже которой распространен довольно мощный горизонт подземных вод повышенной минерализации (до 5—8 г/л).

Весенний поверхностный сток с помощью направляющих земляных дамб вначале аккумулировался в отстойнике, откуда осветленная вода, по-видимому, подавалась в два инфильтрационных бассейна общим объемом 4000 м³ (рис. 19). Период инфильтрационного питания достигал 15 сут.

Максимальная скорость фильтрации была достигнута в течение первых часов работы котлованов — 4,16 м/сут. Затем скорость фильтрации уменьшилась вплоть до окончания опыта. Значение коэффициента фильтрации пород зоны аэрации (насыщения) изменялось на опытном полигоне от 1 до 4,5 м/сут.

В результате искусственного питания в зоне насыщения была сформирована плавающая линза пресных вод, по ориентировочным подсчетам, объемом до 600 м³ под каждым котлованом. Коэффициент полезного действия опытной установки составлял примерно 0,3.

Положительные результаты опытных работ в Западной Туркмении позволяют сделать вывод о том, что метод магазинирования такырного (местного) стока в породах зоны аэрации может найти широкое применение для искусственного создания линз пресных вод с целью удовлетворения нужд хозяйственно-питьевого водоснабжения мелких животноводческих объектов в пустынных зонах СССР.

В этом направлении целесообразно продолжить в сельскохозяйственных районах природной зоны нашей страны опытные и промышленные исследования. Положительное решение проблемы водоснабжения сельскохозяйственных объектов пустынных зон имеет большое народнохозяйственное значение.

Что же касается магазинирования временно действующих поверхностных вод в более крупных объемах, то для этого необходимо иметь большие природные емкости и, естественно, конкретного потребителя. В предгорных частях горно-складчатых районов такие крупные по объему емкости распространены в песчано-галечниковых отложениях, в том числе на площадях конусов выноса. В связи с этим при наличии водопотребителей возникает необходимость проведения в таких районах специальных поисково-разведочных работ.

В этом отношении наиболее перспективными являются предгорные равнины Средней Азии и районы Северного Кавказа.

Для этого может быть использована схема искусственного питания с помощью системы поглощения скважин (рис. 20).

К четвертой же группе следует отнести искусственное формирование запасов напорных водоносных горизонтов, хотя по некоторым специфическим особенностям эти условия можно было бы выделить в самостоятельный тип.

Группа напорного режима фильтрации характеризуется по существу одной наиболее типичной схемой, представленной на рис. 21, 22.

На схеме приведен фрагмент водозаборного участка, на котором в краевых его частях расположены две группы нагнетательных скважин для искусственного питания напорного водоносного горизонта, а в центре расположена взаимодействующая с ними система, — собственно, скважины водозабора.

В таких условиях искусственное питание можно рассматривать как способ воспроизводства в напорном горизонте упругих запасов подземных вод за счет упругих свойств воды и горных пород. В этом состоит одна из отличительных особенностей гидрогеологических условий упругого режима.

Другой особенностью искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов напорных подземных вод является инженерно-техническая. Дело в том, что для напорных вод по

а

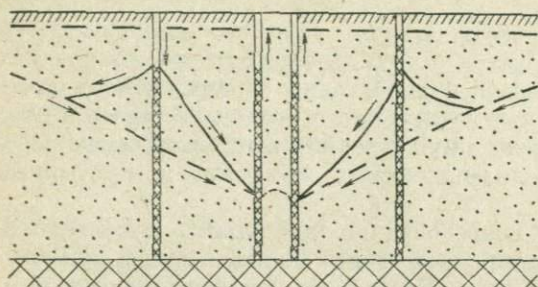


Рис. 20. Схема [искусственного питания подземных вод системой поглощающих скважин.

а — разрез I—I; б — план. 1 — водоносные пески; 2 — водонепроницаемые породы; 3 — почвенный покров; 4 — водонепроницаемые породы; 5 — группа водозаборных скважин; 6 — нагнетательные скважины; 7 — самотечный водовод от отстойников; 8 — фильтры скважин; 9 — уровень грунтовых вод до эксплуатации; 10 — депрессия до нагнетания; 11 — депрессия при дополнительном искусственном питании

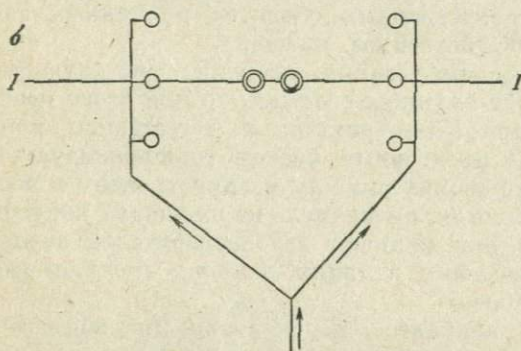
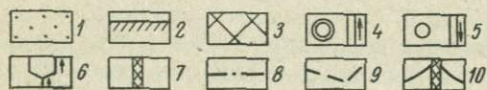
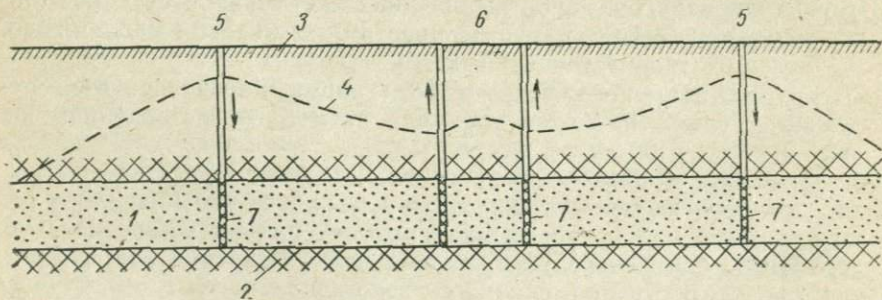


Рис. 21. Схема искусственного воспроизводства запасов напорных подземных вод.

1 — водоносные пески напорного горизонта; 2 — водонепроницаемые породы; 3 — почвенный покров; 4 — пьезометрическая поверхность при нагнетании и вододоборе; 5 — нагнетательные скважины; 6 — водозаборные скважины; 7 — фильтры скважин



б.



существу может быть применен только один способ искусственного воспроизводства их эксплуатационных запасов, а именно с помощью нагнетательных гидрогеологических скважин.

Способ нагнетания воды в скважины имеет существенный недостаток — приемные нагнетательные скважины в процессе их

длительной эксплуатации постепенно снижают свою производительность. Опыт нефтяной промышленности, где широко используются нагнетания поверхностных вод в специальные скважины с целью интенсифицированной отработки нефтяных месторождений (при законтурном заводнении нефтяных месторождений), показывает, что в некоторых случаях приёмистость нагнетательных скважин в напорных пластах снижается в несколько раз (рис. 23).

Причины снижения приёмистости нагнетательных скважин изучены недостаточно. При исследовании было отмечено влияние

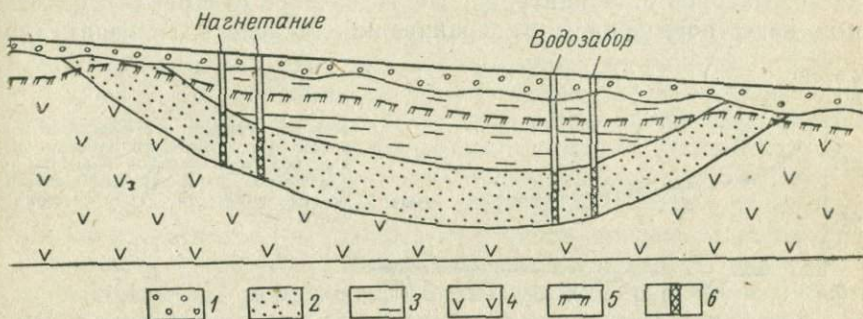


Рис. 22. Схема искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов напорных вод в частично промороженном малом артезианском бассейне.

1 — промороженные песчано-галечниковые аллювиальные образования; 2 — пески водоносные (подмерзлотный водоносный горизонт); 3 — глина; 4 — слабо водопроницаемые эффузивные породы; 5 — границы распространения многолетнемерзлых пород; 6 — фильтры нагнетательных и водозаборных скважин

следующих факторов на изменения поглощающей способности нагнетательных скважин:

- а) фильтрационная неоднородность пород продуктивного горизонта и в первую очередь в призабойной части скважины;
- б) нерациональная для данных условий конструкция фильтра нагнетательной скважины и степень совершенства гидравлической связи водоносных пород с фильтром;
- в) неудовлетворительная подготовка сырой воды к нагнетанию;
- г) химические условия не совместимости пластовых вод и сырой воды;
- д) биологические и химические процессы, снижающие водопроницаемость фильтра и призабойной части скважины;
- е) режим нагнетания.

По-видимому, наиболее существенное влияние на степень приёмистости нагнетательных скважин оказывают физико-химические процессы, возникающие при эксплуатации, природа которых исследована слабо.

Условия искусственного формирования упругих запасов подземных вод в напорном горизонте с помощью нагнетательных скважин являются довольно сложными и требуют на каждом

объекте очень тщательной подготовки исходной воды для нагнетания, а также выбора наиболее рациональной конструкции фильтра и технологии режима питания.

По искусственному воспроизводству эксплуатационных запасов напорных вод в нашей стране были проведены только опытные работы на некоторых водозаборах Северо-Крымских артезианских бассейнов, на одном из водозаборов г. Ленинграда и др.

Интересные результаты опытных работ по искусственному питанию напорных вод приводит П. М. Гасс (1973 г.) по одному из водозаборов г. Ленинграда. На водозаборе отбираются напорные воды повышенной минерализации гдовского горизонта (до

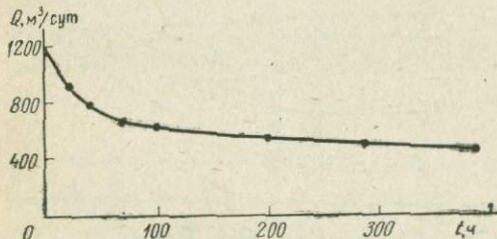


Рис. 23. График изменения скважины при нагнетании поверхностных вод в напорный горизонт с давлением $8 \cdot 10^6$ Па (из опыта исследований на Туймазанефть, скв. 172)

3,5 г/л) для технического водоснабжения промпредприятий. Интенсивная эксплуатация напорных вод привела к значительному снижению пьезометрических уровней (до 50—65 л) в центральной части депрессии на водозаборном участке. Для искусственного воспроизводства упругих запасов были использованы поверхностные воды р. Невы. Приемные сооружения — поглощающие и нагнетательные скважины.

Гдовский водоносный горизонт на опытном участке действующего водозабора характеризуется следующими параметрами: коэффициент фильтрации 4 м/сут, удельные дебиты скважины 1—1,2 л/с, коэффициент пьезопроводности — $2,6 \cdot 10^6$ м²/сут. Гдовский водоносный горизонт обладает высокой приемистостью. Так, в буровых скважинах при свободном наливе очищенной воды р. Невы дебиты достигли 1550 м³/сут, а при нагнетании (до $8 \cdot 10^5$ Па) — 2160 м³/сут. Однако в процессе проведения опытных работ отмечалось довольно заметное снижение приемистости скважин — на 10% от поглощения каждые 400—500 м³ при свободном наливе и на каждые 1400 м³ при нагнетании.

По мнению П. М. Гасса, снижения приемистости скважин происходили в результате изменения фильтрационных свойств песчаников в призабойной части выработки в связи с процессами коррозии обсадных труб и выпадением в осадок железа. Приемистость скважин восстанавливалась методом проведения опытных откачек.

Таким образом, опытные работы показали реальную возможность искусственного воспроизводства упругих запасов напорных вод на действующем водозаборе.

Положительные результаты были получены при проведении опытных работ по наливу — нагнетанию поверхностных вод из Северо-Крымского канала в водозаборные скважины Северо-Сивашского артезианского бассейна.

На площади артезианских бассейнов Степного Крыма в настоящее время отбор подземных вод напорных горизонтов (в трещинных трещиноватых породах) для орошения земель превышает их естественное ежегодное восполнение. Это привело к формированию обширной воронки депрессии и ухудшению качества воды за счет подтягивания минерализованных вод, залегающих ниже по разрезу.

В связи с пуском в эксплуатацию Северо-Крымского ирригационно-обводнительного канала появилась возможность проектировать искусственное воспроизводство упругих запасов напорных вод артезианских бассейнов путем нагнетания поверхностных вод канала. С целью проверки такого проекта на двух участках было проведено опытно-промышленное нагнетание. Общий дебит водопоглощения при опытах составлял в двух скважинах с. Танковое — 0,28 м³/с и в шести скважинах г. Красноперекоска — 1,2 м³/с. Нагнетание поверхностных вод канала мутностью до 41 мг/л вызвало коагуляцию пород в призабойной части скважин и уменьшение удельного их водопоглощения в два-три раза от первоначального.

Опытно-промышленные испытания в артезианских скважинах Степного Крыма показали, что при искусственном воспроизводстве эксплуатационных запасов напорных вод требуется прежде всего при бурении нагнетательных скважин тщательно соблюдать технологию их проводки, чтобы обеспечить надежное оборудование всей конструкции, в том числе фильтром, и затрубную цементацию выработки. Необходима более тщательная подготовка «сырой воды» для нагнетания.

Методика воспроизводства упругих эксплуатационных запасов напорных вод требует дальнейшей разработки и проверки ее на практике. В этом отношении осуществление проекта в Степном Крыму представляет большой интерес.

Условия формирования искусственных запасов подземных вод второй группы

Вторая группа (см. табл. 1) в гидрогеологическом отношении характеризуется тем, что на объекте в природных емкостях происходит искусственное формирование ресурсов и запасов подземных вод под влиянием нецеленаправленного режима инфильтрации поверхностных вод. Гидрогеологические процессы в данном случае нередко предопределяют искусственное формирование крупных месторождений подземных вод.

Искусственное формирование месторождений подземных вод происходит по влиянием неизбежных потерь поверхностных вод

в процессе длительной эксплуатации таких гидротехнических сооружений, как крупные ирригационно-обводнительные и судоходные каналы, равнинные водохранилища, или на крупных массивах орошения.

Отличительная особенность второй группы формирования искусственных ресурсов и запасов пресных подземных вод заключается в том, что эти процессы формирования охватывают большие площади, создавая в некоторых условия линейно вытянутые потоки грунтовых вод, а при благоприятных геолого-литологических условиях типичные самостоятельные водоносные горизонты.

Как известно, строительство крупных ирригационно-обводнительных и транспортных каналов осуществляется в естественных породах без изоляционных покрытий. Даже такое сооружение, как Туркменский канал, трасса которого проходит частично через каракумские пески, не имеет «одежды». Поэтому всегда на каналах на всей их трассе наблюдаются неизбежные потери поверхностных вод на фильтрацию (по дну и откосам канала).

Потери на фильтрацию и являются постоянным источником питания искусственно формирующихся вдоль канала потоков грунтовых вод. Такие потоки формируются в породах зоны аэрации преимущественно на тех участках, где они имеют хорошие фильтрационные свойства.

В аридной зоне СССР очень часто первый от поверхности естественный горизонт грунтовых вод имеет повышенную минерализацию. В таких условиях под каналами формируются искусственным путем потоки в форме плавающих линз пресных вод, известных под названием — приканальные линзы (см. рис. 6).

При относительно однородных и хороших фильтрационных свойствах горных пород и небольшой по мощности зоны аэрации достаточно быстро формируется гидравлическая связь поверхностных вод в канале с уровнем вновь сформировавшихся грунтовых вод. Накопление запасов линзы пресных подземных вод происходит по схеме подпертой фильтрации, которую при оценке эксплуатационной возможности можно рассматривать как зону постоянного напора. В условиях глубокого залегания уровня соленых грунтовых вод и довольно значительной мощности пород зоны аэрации вдоль трассы канала при потерях поверхностных вод формируется «свободный» режим фильтрации в покровных образованиях и смыкания линзы пресных вод с уровнем соленых вод может и не произойти.

Однако в том и другом случае, при длительной эксплуатации канала, под влиянием процессов кольятации и заиливания дна фильтрационные потери поверхностных вод будут постепенно затухать. В связи с этим может ухудшиться питание ранее сформировавшейся линзы пресных вод. На участках действующих водозаборов в таких случаях для восстановления искусственного питания каптажных скважин производят чистку канала.

Исследованиями в районах Среднеазиатских республик установлено, что при благоприятных гидрогеологических условиях на площади распространения приканальных линз могут сформироваться достаточно крупные эксплуатационные запасы пресных подземных вод, которые могут служить надежным источником водоснабжения не только мелких сельскохозяйственных объектов, но и крупных городов.

Так, по данным С. Ш. Мирзаева (1976 г.) в Узбекистане много лет действует Бешарыкский водозабор, построенный на канале Шахруд, где используются запасы пресных подземных вод приканальной линзы для водоснабжения г. Бухары. В Узбекистане, Киргизии, Таджикистане и Туркмении запасы пресных подземных вод приканальных линз используются для водоснабжения городов и сельскохозяйственных объектов.

Не менее важное значение для практики имеет искусственное формирование новых водоносных горизонтов пресных подземных вод в породах зоны аэрации за счет неизбежных инфильтрационных потерь в чаше равнинных водохранилищ (шестой выделенный тип гидрогеологических условий). Нередко при этом происходит искусственное усиление питания существующих водоносных горизонтов, что очень важно для оценки работы действующих водозаборов.

В благоприятных геолого-литологических условиях под влиянием искусственного питания может сформироваться слабонапорный водоносный горизонт (см. рис. 7). Тогда при оценке эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборных участках, расположенных в прибрежной части водохранилища, этот горизонт можно рассматривать как зону постоянного напора.

Практика эксплуатации крупных равнинных водохранилищ в республиках Средней Азии, в бассейне р. Волги и на юге Украины показывает, что инфильтрационные потери поверхностных вод во многих случаях создают благоприятные предпосылки для искусственного формирования в покровных образованиях месторождений подземных вод. Эксплуатационные запасы таких месторождений могут служить надежным источником водоснабжения крупных объектов водопотребления. Так, например, на площади влияния Каховского водохранилища формируются перспективные эксплуатационные ресурсы подземных вод более 20 м³/с.

Седьмой тип искусственного формирования запасов подземных вод характеризуется площадным питанием за счет потерь поливных вод на полях крупных массивов орошения. В этих условиях естественные водоносные горизонты по существу получают в вегетационный период периодическое искусственное питание.

В связи с применением на полях орошения химических удобрений искусственный источник питания нередко загрязняет грунтовые воды, что несомненно отражается на их практическом использовании. При разведке подземных вод на массивах орошения эти условия необходимо учитывать и тщательно изучать.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОСПОЛНЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ЗАДАЧИ И СХЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОСПОЛНЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Задачи и схемы улучшения качества воды при искусственном восполнении подземных вод определяются требованиями не только к качеству, но и к количеству получаемой воды, а также рядом природных и технических условий. В связи с этим нужно предъявлять требования к воде, получаемой из водозаборов, а также подаваемой на инфильтрацию сооружения.

Чаще всего для искусственного восполнения используются поверхностные воды, которые в разной степени могут быть загрязнены. Перед подачей на инфильтрационные сооружения в ряде случаев может потребоваться предварительная водоподготовка — улучшение качества воды на очистных сооружениях, например в отстойниках.

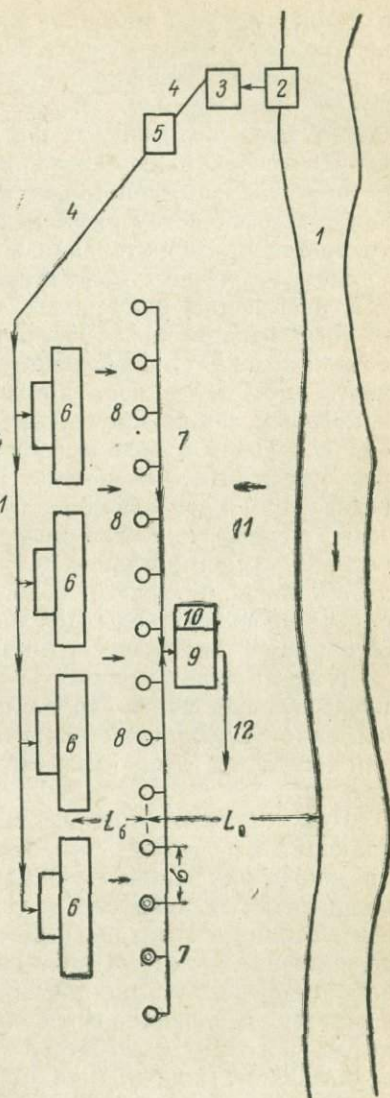
Качество подземных вод при искусственном их восполнении также зависит от состава и свойств естественной подземной воды в результате смещения с подаваемой водой; кроме того, на состав восполняемых подземных вод могут влиять и свойства пород водоносного слоя и зоны аэрации.

Улучшение качества воды, например, для хозяйственно-питьевого водоснабжения ведется по показателям органолептических свойств воды (мутность, цветность, вкус, запах), химического состава (особенно вредных веществ), биологического состава (особенно патогенных организмов), а также температуры воды. В этом случае улучшают качество воды до требований ГОСТ 2874—73. Для других потребителей вода должна удовлетворять соответствующим нормам и кондициям.

Подземная вода, получаемая из водозаборов подземных вод, может не удовлетворять требованиям потребителя, и тогда дополнительно улучшают ее качество, например, по бактериологическим показателям или обезжелезиванию, в частности для хозяйственно-питьевого водоснабжения до норм ГОСТ 2874—73 «Вода питьевая». В некоторых случаях качество подземных вод при искусственном их восполнении может ухудшиться в водоносном горизонте, например увеличится содержание железа. Все это надо тщательно взвесить при изысканиях, при оценке

Рис. 24. Схема искусственного восполнения подземных вод из поверхностных с инфильтрационными бассейнами и береговой инфильтрацией (в плане).

1 — река (водохранилище, озеро); 2 — водозабор из поверхностных вод; 3 — насосная станция первого подъема; 4 — трубопроводы; 5 — сооружения для предварительного улучшения качества воды; 6 — инфильтрационные бассейны; 7 — водозабор подземных вод из скважин; 8 — скважины; 9 — насосная станция второго подъема; 10 — хлораторная; 11 — водоносный горизонт; 12 — водовод от насосной станции второго подъема к потребителю. Стрелками показано направление движения воды в водоносном горизонте и в трубах.



эксплуатационных запасов подземных вод и при проектировании их использования.

Улучшение качества воды при искусственном восполнении с учетом указанных выше замечаний следует исследовать и проектировать, чтобы получать воду дешевле, в достаточном количестве и хорошего качества.

Распределение улучшения качества воды в общей системе искусственного восполнения следует предусматривать так, чтобы максимально использовать природные условия и в случае необходимости наиболее дешевые методы предварительной или последующей очистки воды. Например, при использовании поверхностных вод для искусственного восполнения подземных вод предпочтение следует отдавать водохранилищам и озерам, где вода отстаивается, но при этом необходимо учитывать возможности ухудшения качества, например при сильном развитии планктона (в частности, синезеленых водорослей). При необходимости предварительно можно улучшать качество воды, например, в простых открытых дешевых отстойниках. Также рационально следует использовать очистку воды в инфильтрационных бассейнах, зоне аэрации и в водоносном горизонте.

Рассмотрим общую схему искусственного восполнения подземных вод из поверхностных (рис. 24).

Улучшение качества воды должно начинаться с источника восполнения, выбора места водозабора из поверхностных вод,

а также типа и конструкции самого водозабора. Выбор места водозабора играет существенную роль, так как качество воды в реке (озере, водохранилище) на разных участках и глубинах может быть разное. Это в известной степени предопределяет выбор типа водозабора, но конструкция его должна удовлетворять требованиям задерживания и удаления плавающих предметов, а также крупной взвеси. Если вода не удовлетворяет требованиям по качеству инфильтрационных бассейнов, то предусматривается предварительная водоподготовка (см. рис. 24).

Перед подачей в инфильтрационные бассейны вода аэрируется для насыщения кислородом из воздуха. Затем вода поступает в инфильтрационные бассейны, где происходит улучшение ее качества во время пребывания в этом бассейне и при инфильтрации через дно. Далее вода проходит через зону аэрации в песках, в которых также происходит улучшение ее качества. Наконец, она поступает в водоносный горизонт, где происходит дальнейшее улучшение ее качества. Если качество воды, полученной из водозабора, удовлетворяет требованиям, то она идет к потребителю, если не удовлетворяет требованиям потребителя, то производится дополнительное улучшение. Если хлорирование для хозяйственно-питьевого водоснабжения не нужно, то все же на случай проскоков воды с неблагоприятными бактериальными показателями обычно предусматривается установка для хлорирования.

Когда в воде встречаются токсичные соединения в количествах, превышающих норму, то схема очистки должна быть разработана особенно тщательно — гарантировано исключение недопустимых концентраций токсичных соединений в воде, подаваемой к потребителю.

При составлении схемы очистки воды при искусственном восполнении необходимо рационально и экономически выгодно распределить улучшение качества воды между отдельными звеньями очищающих элементов, включая инфильтрационные бассейны, зону аэрации и водоносный горизонт. В случае искусственного восполнения для хозяйственно-питьевого водоснабжения при помощи инфильтрационных (поглощающих) скважин требования к качеству подаваемой в эти скважины воды повышаются, особенно по мутности, химическому составу, биологическим и другим показателям. Вода должна быть светлая и при поступлении в водоносный горизонт не должны выпадать осадки, т. е. не должно происходить коагуляции поглощающих скважин и водоносного горизонта. В указанном случае при мутности воды более 1—2 мг/л необходима предварительная водоподготовка для осветления воды до необходимых кондиций. Вообще для хозяйственно-питьевого водоснабжения при инфильтрации через поглощающие скважины исходная вода по качеству должна практически соответствовать кондициям питьевой воды или при предварительной водоподготовке должна быть улучшена до указанных кондиций.

В некоторых случаях требования к качеству исходной воды,

подаваемой для инфильтрации (например, на затопляемую пойму, в староречье — пруды, путем русловой инфильтрации), в основном к мутности, могут снижаться. Это обосновывается необходимыми исследованиями и расчетами. Но при этом вода, получаемая водозаборами подземных вод, как правило, должна отвечать кондициям и ГОСТу.

В случае использования подземных вод того же горизонта или других водоносных горизонтов предварительная водоподготовка обычно отпадает совсем.

Вообще нужно стремиться разрабатывать такую схему искусственного восполнения подземных вод, в которой наиболее дорогую часть — предварительную водоподготовку — свести к минимуму, оставив аэрацию и при необходимости отстаивание.

ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ВОДЫ, ПОЛУЧАЕМОЙ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОСПОЛНЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Качество воды, получаемой при искусственном восполнении подземных вод, определяется назначением ее использования.

В СССР для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения вода должна удовлетворять требованиям ГОСТ 2874—73 «Вода питьевая»; несоблюдение этого стандарта преследуется законом.

В указанном ГОСТе приводятся предельные нормы для питьевой воды: 1) бактериальных показателей, 2) общих физических и химических показателей, 3) содержание токсичных веществ и 4) органолептических показателей.

Общее количество бактерий должно быть не более 100 в 1 мл, а бактерий группы кишечной палочки при соответствующих условиях определения по показателю коли-индекс — не более трех бактерий в 1 л воды и по показателю коли-титр — не менее 300 мл на 1 бактерию. Содержание вредных веществ по табл. 2 ГОСТ 2874—73 должно быть не более (в мг/л): бериллия — 0,0002; молибдена — 0,5; мышьяка — 0,05; нитратов (по N) — 10,0; полиакриламидов — 2,0; свинца — 0,1; селена — 0,001; стронция — 2; фтора — для первого и второго климатических районов 1,5, для третьего климатического района — 1,2, для четвертого климатического района — 0,7; урана природного и урана-238 — 1,7; предельные показатели для радия-226 и стронция-90 — соответственно $1,2 \cdot 10^{-10}$ и $4 \cdot 10^{-10}$ Ки/л. Допустимое содержание других веществ по табл. 4 ГОСТ 2874—73 принимается не более (в мг/л): сухого остатка — 1000; хлоридов — 350; сульфатов — 500; железа — 0,3; марганца — 0,3; меди — 1,0; цинка — 5,0; остаточного алюминия — 0,5; гексаметофосфата — 3,5; триполифосфата — 3,5; а общей жесткости не более 7,0 мг·эquiv/л.

По согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы содержание сухого остатка допускается до 1500 мг/л, а общая жесткость — до 10 мг·эquiv/л.

Для подземных вод без установок для обезжелезивания содержание железа допускается до 1,0 мг/л.

Суммарное содержание токсичных веществ, отмеченных из табл. 2 ГОСТ 2874—73, а также суммарное содержание сульфатов и хлоридов, если последние придают воде привкус, не должно быть более единицы от суммы долевых частей (по отношению к их предельной допустимой концентрации) по формуле

$$\frac{c_1}{C_1} + \frac{c_2}{C_2} + \dots + \frac{c_n}{C_n} \leq 1, \quad (1V.1)$$

где c_1, c_2, \dots, c_n — обнаруженные концентрации, мг/л;

C_1, C_2, \dots, C_n — предельные концентрации по норме, мг/л.

По указанному ГОСТу водородный показатель (рН) должен быть в пределах 6,5—8,5. Следует учитывать также дополнительные указания о допустимых концентрациях различных веществ, установленные Министерством здравоохранения СССР для водоемов. Например, остаются в силе показатели предельно максимальных концентраций веществ, не вошедших в ГОСТ 2874—73, хотя и утвержденных еще 28 декабря 1972 г. за № 1003—72 Министерством здравоохранения СССР («Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде водоемов санитарно-бытового использования и требования к составу и свойствам воды водоемов у пунктов питьевого и культурно-бытового водопользования»), а именно (в мг/л): ртути — 0,005; никеля — 1,0; кобальта — 1,0; кадмия — 0,01; нитратов (по азоту) — 10,0; аммиака (по азоту) — 2,0; цианидов (в расчете на циан) — 0,1 и др.

Пределы органолептических свойств в ГОСТ 2874—73 приняты: запах при 20° С и подогревании воды до 60° С — 2 балла, привкус при 20° С — 2 балла, цветность по платино-кобальтовой шкале — 20 градусов и мутность по стандартной шкале — 1,5 мг/л.

Цветность часто зависит от гумусов. Наиболее интенсивно окрашивают воду гуминовые кислоты, которые сравнительно легко разлагаются; фульвокислоты, входящие в гумус, окрашивают воду менее интенсивно, так как разлагаются они значительно труднее.

Запах и привкусы чаще всего биологического происхождения — в результате жизнедеятельности и отмирания микро- и макроорганизмов в воде; наиболее устойчивый и трудноустраняемый землистый и затхлый запах вызывается актиномицетами.

В отмеченных указаниях Министерства здравоохранения СССР дополнительно приводятся также предельные содержания ряда органолептических показателей (в мг/л), например: бария — 4,0; железа — 0,5; нафтеновых кислот — 0,3; фенола (карболовая кислота) — 0,001; хрома (Cr^{6+}) — 0,1 и хрома (Cr^{3+}) — 0,5; некоторых ПАВ — 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 (рекомендация), свинца — 0,05 мг/л; но по некоторым показателям требования более низкие, например: нитратов допускается до 45 мг/л, аммония до 10 мг/л (без указания его природы), селена — до 0,01 мг/л, радия-226 — $3 \cdot 10^{-10}$ Ки/л.

«Европейские нормы качества воды Всемирной организации труда» (1963) также несколько отличаются от стандарта СССР.

Наибольшее отличие заключается в требованиях по радиоактивности (менее жесткие), а по содержанию кишечной палочки (более жесткие): в 95% проб объемом 100 мл каждая не должно быть кишечной палочки.

В требованиях к качеству хозяйственно-питьевых вод не входят показатели наличия в таких водах вредных и опасных растительных и животных одноклеточных и многоклеточных организмов, например, гельминтов, амев и др. Некоторые из них, в частности, амевы — из отряда простейших животных класса корненожек, микроскопически малы, при неблагоприятных условиях превращаются в цисту. Амевы паразитируют у человека и животных; одна из амев является возбудителем очень опасной амевной дизентерии.

В подозрительных случаях в исследованиях подземных вод для хозяйственно-питьевых целей следует включать специальный гидробиологический анализ.

При оценке качества воды следует также учитывать возможные ее агрессивность и выпадение осадков.

К воде для водопоя животных следует предъявлять те же требования, что и для хозяйственно-питьевого водоснабжения людей; в засушливых районах требования к минерализации снижаются. В пустынях Средней Азии и других аридных районах по некоторым данным для водопоя овец используется вода с минерализацией до 5—7 г/л и более, а для верблюдов до 8—10 г/л и даже более; для молодняка такие высокие нормы следует уменьшить, в особенности при значительной доли сульфатов. Необходимо отметить, что приведенные повышенные нормы относятся обычно к децентрализованному водоснабжению. Учитывая ряд дополнительных условий (сезонность, наличие разного качества трав пастбищ, сроки водопоя и проч.), а также дискуссионность этого вопроса, нормы качества воды следует согласовывать с сельскохозяйственными организациями в каждом конкретном случае с учетом ряда местных условий. Однако во всех случаях вода не должна содержать вредных для скота веществ и патогенных организмов.

Для производственного водоснабжения и для технических целей вода должна отвечать требованиям конкретного производства, и качество ее должно согласовываться с проектными и эксплуатирующими организациями. Но вода, например, для пищевых технологических целей, увлажнения воздуха и т. п. должна соответствовать кондициям питьевой воды.

Оценка качества воды для орошения определяется рядом условий — дренированием, свойствами почвы, культурой. Некоторые рекомендуемые данные даже в «Инструкции по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод» (1962) нельзя считать обоснованными. Например, в вышеуказанной инструкции при минерализации 5 г/л вода считается непригодной для орошения.

В Триполитании при высокопроницаемых почвах орошают водой с минерализацией до 10 г/л; в Сахаре в оазисах Сива и Гара, по нашим данным, при средне- и слабопроницаемых почвах и дренировании открытыми каналами для орошения применяется вода с минерализацией 6—7 г/л и более.

Поэтому оценку качества воды для орошения следует делать с учетом и анализом всех местных условий и требований соответствующих организаций.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПО УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОСПОЛНЕНИИ

Улучшение качества воды при искусственном восполнении подземных вод является одним из первостепенных вопросов в особенности для хозяйственно-питьевого водоснабжения, так как чаще всего источником восполнения являются поверхностные воды, качество которых по органолептическим, химическим и биологическим (включая бактериологические) показателям чаще не удовлетворяют требованиям потребителя.

В настоящее время достаточно разработаны теоретические основы и получен значительный практический опыт по улучшению качества воды при искусственном восполнении. Однако еще не всегда можно получить однозначное решение, что зависит как от многообразия условий, так и от недостаточно четких теоретических представлений. Улучшение качества воды связано со следующими процессами:

1) механическим осаждением взвешенных частиц и организмов в воде и задерживание в решетках, сетках, пленке и в рыхлых грунтах. Эффект механического действия может для соответствующих условий улучшаться путем обработки воды (введение коагулянтов и флокулянтов);

2) физическим, химическим и физико-химическим;

3) биологическим;

4) сорбцией физической и химической, адгезией;

5) ионным обменом;

6) коагуляцией и флокуляцией.

Все эти процессы взаимно зависят от физических, химических, физико-химических и биологических условий (температура, свет, рН, насыщенность кислородом, наличие ПАВ, наличие одноклеточных и многоклеточных низших и высших организмов). Напри-

мер, при рН меньше 5 и больше 8 бактериологическая активность снижается.

Весьма важным для процесса улучшения качества воды является наличие или отсутствие различных химических соединений, а также их концентрация в воде. Например, размножение бактерий может происходить сначала даже без наличия фосфора в воде, но для благоприятного 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. Примеров взаимосвязи физических, химических и биологических процессов и условий можно привести много.

Улучшение качества воды наиболее полно изучено в очистных сооружениях для водоснабжения и канализации, особенно в отстойниках и скорых фильтрах. Следует учитывать, что в системе искусственного восполнения отдельные его элементы — поверхностная инфильтрация (бассейны, пруды), зона аэрации и водоносный горизонт по своим условиям значительно отличаются от очистных сооружений 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 взвеси, которая под влиянием различных процессов коагулируется, 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.

Во время пребывания воды в бассейнах и прудах (до инфильтрации) в ней развивается планктон, и в частности синезеленые, диатомовые и другие водоросли, которые могут в естественных условиях способствовать 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 кислород окисляет органическое вещество и в бассейнах 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 может ухудшаться. При отстаивании и фильтровании, в особенности с коагулированием, и при снижении мутности воды до 0,5 мг/л, по данным исследований очистки воды для водоснабжения, удаляются вирусы до 97—98% и бактерии до 2—10 клеток/мл.

Теория и практические положения очистки воды при фильтрации хорошо освещены в работах советских ученых (Д. М. 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. М. Минца, С. А. Шуберта, В. П. Криштула, А. М. Перлиной и др.), которые процессы задерживания различных частиц при объемном скором фильтровании рассматривают как суммарное явление накопления осадка и его частичное разрушение. Теоретически по такому же принципу улучшения качества должны работать водоносный горизонт и зона аэрации. При этом чем мельче зерна грунта, тем больше удельная их поверхность и, следовательно, тем больше задерживающая способность. В то же время различие процессов задерживания частиц в водоносном горизонте и скорых фильтрах заключается в том, что в водоносный горизонт после инфильтрационных бассейнов поступает вода со скоростью до 1—3 м/сут, т. е. много медленнее, чем в скорых фильтрах, и при этом или без мути, или с ничтожным количеством мути (не более 1—3 мг/л). Кроме того, водоносный горизонт по емкости значительно больше фильтров. Но поглощающая емкость водоносных горизонтов не бесконечна, поэтому необходимо рационально использовать возможности очищающей способности водоносных горизонтов.

Одним из важных факторов улучшения качества воды при микробном (и вирусном) загрязнении является время 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 (Звягинцев, 1973, и др.) и зарубежных ученых выявлены очень важные закономерности взаимодействия микроорганизмов и поверхностей твердых тел. На поверхности твердых тел в водной среде физические и химические условия отличаются от условий этой среды, например, по концентрации растворенных веществ, рН (может быть разница на 0,5—2 единицы), активности ионов водорода и др. На таких поверхностях в водоносных песках микробы могут оказаться в более благоприятных условиях для развития, чем собственно в подземной воде. Поэтому биологические исследования только подземной воды без учета водоносных

песков могут дать неправильное представление. К сожалению, такие исследования в природных условиях у нас пока не проводятся. Следует учесть, что неорганические и органические частицы меньше, чем клетки, близкие к коллоидам или коллоидные, прилипают к клетке. Это существенно влияет на жизнедеятельность клетки.

По мнению Е. И. Моложавой и частично Т. П. Николаевой (1973 г., 1974 г., 1976 г.), в адсорбционном состоянии (то же, адгезии) в песчаных грунтах микроорганизмы выживают больше, а при температуре 18—25° С способны размножаться санитарно-показательные бактерии группы кишечной палочки и патогенные энтеро-бактерии (сальмонеллы и др.). Адсорбированные из речной воды в мелких водоносных песках при температуре 8—20° С бактерии длительное время сохраняют свою жизнеспособность: различные штаммы кишечной палочки и энтерококка — 60—80 дней при коли-индексе 10⁶ и содержаниях энтерококка 10⁵ микробных тел в 1 л (м. т/л). Такая высокая выживаемость относится к сильно загрязненным водам. Отмечаются также случаи выживаемости бактерий более года.

В мелко- и среднезернистых песках при скорости движения подземной воды 0,5—2,0 м/сут вакцинный штамм вируса полиомиелита на длине пути 30—50 см полностью задерживается, а фаг *T. E. Coli* задерживается на пути 2—25 м в зависимости от степени зараженности. Это надежный показатель вирусного загрязнения.

Споровые формы бактерий (споры антракоида и клостридии) в песках задерживаются на длине 1 м. Разные штаммы *E. Coli* распространяются до 3—10 м, а разновидности бактерий группы кишечной палочки и энтерококка — на расстоянии от 10 до 200 м в зависимости от условий. В зоне аэрации при наличии органических веществ в воде под инфильтрационным бассейном при температуре 24—25° С создаются благоприятные условия для развития сапрофитов и бактерий группы кишечных палочек.

По лабораторным опытам выживаемость при сохранении вирулентности сальмонелл паратифа при плотности заражения 10² м. т/л наблюдалась до 220 сут, а при плотности заражения 10⁴ м. т/л — до 400 сут. Выживаемость сальмонелл брюшного тифа соответственно наблюдалась до 50—56 и 120 сут в зависимости от штаммовой принадлежности и условий. При температуре 18—20° С выживаемость сальмонелл паратифа В колеблется от 94 до 140 сут.

Выживаемость шигелл при 10³ м. т/л достигает 170 дней и при 10⁴ — более 300 сут.

Вирус полиомиелита сохраняет жизнеспособность в водоносных грунтах около 100 сут, а фаг *E. Coli* около 400 сут при исходном содержании в воде 10³ БОЕ/мл. Выживаемость и вирулентность бактерий зависит от условий. Например, при содержании ПАВ аниопоактивной группы (сульфанола НП-1 в концентрации

5—10 мг/л) наблюдается большая выживаемость бактерий, но в то же время снижается выживаемость вакцинного штамма вируса полиомиелита и фага *E. Coli*. Сульфанол НП-1 при указанных концентрациях также уменьшает примерно в 1,5 раза в водоносных песках прилипание кишечной палочки и энтерококка, увеличивая их десорбцию.

Улучшение качества воды по содержанию в ней растворенных вредных и нежелательных веществ в системе искусственного восполнения подземных вод начинается в инфильтрационном бассейне (особенно при развитии в нем соответствующей флоры). В дальнейшем при фильтрации воды через пленку, закольматированные пески, зону аэрации и водоносный слой задерживание вредных веществ может происходить в результате сорбции, но при этом может происходить и десорбция.

При оценке качества воды следует учитывать также разбавление исходной воды в водоносном горизонте. По вопросам сорбции опубликован ряд работ с теоретическими расчетами, а также лабораторными экспериментами (Н. Н. Веригин, В. М. Шестаков, А. Е. Орадовская, М. И. Гольдин, Д. Г. Красильщиков, Е. И. Моложавая и др.). Работы по расчету сорбции и десорбции основаны на теории массообмена и массопереноса и при получении необходимых коэффициентов в соответствующих условиях дают возможность получить удовлетворительные результаты.

Лабораторные исследования по задерживанию в водоносных песках разных вредных веществ опубликованы в ряде зарубежных и отечественных работ (Е. И. Моложавая, Д. Г. Красильщиков — 1973, 1976 г., и др.).

По данным Е. И. Моложавой, соли хрома при концентрациях 10 ПДК (предельно допустимая концентрация) в водоносных песках не задерживались. Однако при фильтрации речной воды, содержащей соли металлов и нефтепродукты не более ПДК и кратковременном повышении концентрации до 2—3 ПДК соли свинца, цинка, хрома и нефтепродукты полностью задерживались, а ртутьсодержащие соединения — частично на длине 40 м.

Интересные данные о сорбции некоторых трудноокисляющихся полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) приводятся Е. И. Моложавой («Изучение сорбционной способности водонасыщенных грунтов при фильтрации воды, загрязненной 3,4-бензопиреном и нефтепродуктами», 1973). Наиболее часто встречающийся ПАУ 3,4-бензопирен (БП) канцерогенного действия при фильтрации в песках со скоростью 1,1 м/сут задерживался на 92,2—98,25% меньше в песках с диаметром зерен 0,5—1 мм и больше в песках с диаметром зерен 0,5—0,25 мм. В присутствии же ПАВ (сульфанол НП-1) в концентрации 10 мг/л задерживание БП снижалось до 87,7%, т. е. на 4,5%, что объясняется не только влиянием активности сорбции, но и увеличением растворимости 3,4-БП. Вообще снижение задерживания с 92,2 до 87,7% невелико даже в пределах точности исследований. При

концентрации 3,4-БП 0,0007—0,006 мг/л в речной воде и фильтрации в средне- и мелкозернистых песках уже через 3 м и в начале фильтроциклов (до образования пленки) 3,4-БП не обнаруживался.

Там же Е. И. Моложавой приводятся данные о задержании нефтепродуктов в воде при фильтрации со скоростью 1 м/сут в песках без пленки при диаметре зерен 0,25—0,5 мм (на пути 1 м задерживается 23—29% от начальной концентрации 14—23 мг/л и 15,2% от начальной концентрации 32 мг/л). При увеличении диаметра зерен песка до 0,5—1 мм при тех же прочих условиях задерживалось только 3%. В таких случаях крупность песка играет существенную роль. При наличии же пленки нефтепродукты задерживались на 74—83% в зависимости от размеров зерен песка. Кстати, такие канцерогены, как 3,4-бензопирен, хорошо (до желаемых пределов) сорбируются активированным углем; марки и дозы активированного угля устанавливаются для каждого случая.

Очистка от трудноокисляющихся веществ, таких, как нефть и ряд ее продуктов, ряд пестицидов, фенолов, большинство ПАВ и другие, обеспечивается специальными и дорогими методами. Некоторые вещества (например, ПАВ) к тому же часто усиливают глубокое проникновение других веществ, а также организмов, сильно затрудняя очистку. При наличии таких веществ требуется компетентный анализ для предложения очистки воды, учитывая токсичность (с канцерогенностью) ряда веществ, а также опасность, связанную с суммированием неблагоприятного их действия. Следует отметить, что наличие ряда этих веществ вызывает неприятные запахи и привкусы (например, ДДТ при концентрации 0,07 мг/л). Некоторые ПАВ и анионоактивные персистентные пестициды хлорорганической группы очень устойчивы и многие месяцы могут сохраняться в воде. По данным Д. Г. Красильщикова (1973), при начальной концентрации ДДТ 2 мг/л в воде через 20 дней осталось его еще 1,28 мг/л, т. е. 64,4%. При этом наличие сульфанола НП-1 не оказало существенного влияния на биохимическую деградацию пестицида. Последний вообще оказывает тормозящее действие на потребление кислорода и, вероятно, угнетает сапрофитную микрофлору, мешая биохимическим процессам окисления органики. Некоторые пестициды при сравнительно незначительной персистентности разрушаются значительно быстрее, например гербицид симазин при концентрации 50 мг/л в речной воде уже на десятки суток имел концентрацию всего 6,3 мг/л, т. е. 12,6% от первоначальной. При наличии в воде сульфанола НП-1 с концентрацией в 10 раз больше допустимой отмечается замедление биохимического окисления указанного гербицида.

Следует отметить, что в настоящее время специальная очистка от высокоперсистентных хлорорганических пестицидов очень дорога. При фильтрации в водоносных грунтах пестициды и детер-

генты могут адсорбироваться, но, к сожалению, долго сохраняются и могут вымываться; тогда можно рассчитывать только на небольшую очистку воды от них (лишь некоторые с небольшой персистентностью достаточно быстро разрушаются). Сложность борьбы с пестицидами, многие из которых токсичны, определяется также существенными затруднениями их выявления. В настоящее время известно более 100 000 препаратов пестицидов, большинство из которых требует специального определения.

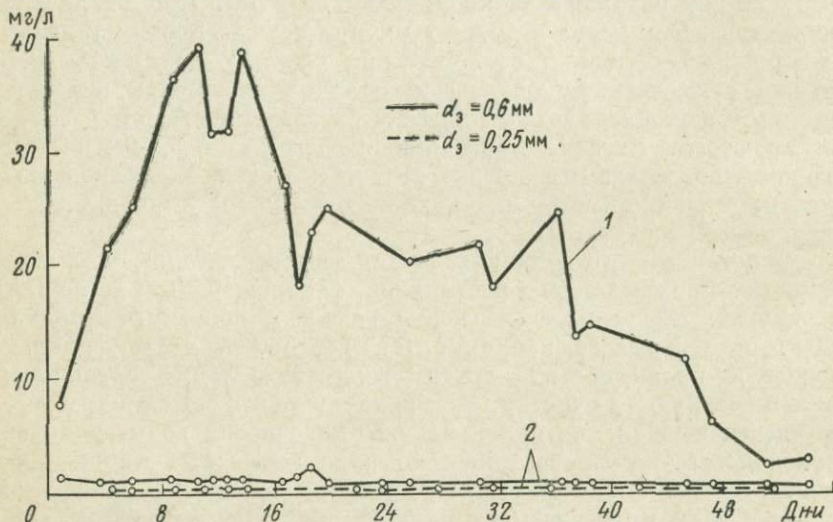


Рис. 25. Изменение мутности при фильтрации речной воды через песчаную загрузку. 1 — вода р. Сходни; 2 — фильтрат ($h = 3$ м)

В связи с вышеизложенным во всех установках искусственного восполнения грунтовых вод следует предусмотреть полное насыщение и даже перенасыщение подаваемой воды кислородом. Перенасыщение (в меру) кислородом воды особенно важно для более глубокой очистки от нефти и подобных компонентов. Из перенасыщенной воздухом воды выделяются пузырьки диаметром 100—200 мк, прилипают к частицам нефти и других загрязнений, благоприятствуют процессу коагуляции взвешенных частиц. Однако при искусственном восполнении, когда в водоносном горизонте имеются закисные соединения, подача в этот горизонт воды, богатой кислородом, приведет к окислению закисных соединений в воде, их выпадению в осадок (в большинстве случаев), и в результате этого может быть кольматация скважин и частично водоносного слоя.

Очень интересные лабораторные опыты по влиянию фильтрации воды в песках на качество воды опубликованы В. М. Бердановым (1971, 1976), а также А. М. Перлиной и В. М. Бердановым (1971).

В. М. Бердановым (1971) опыты проводились в колоннах диаметром 100 мм с высотой загрузки, равной 3 и 2,5 м; песок брался

с эффективным диаметром d_3 0,85; 0,34 и 0,25 мм; скорость фильтрации была 2 м/сут. Непрерывная работа продолжалась от 20 до 112 дней. Исходная вода бралась из р. Сходни с добавкой сточной воды и из р. Сейма (выше г. Курска). В табл. 2 приведены данные о проникновении в пески фильтра после фильтроцикла в 112 дней взвешенных в воде частиц с органикой, а также бактерий. В указанных песках (см. табл. 2) механическое загрязнение заметно проникает до 1—3 см, а бактериальное загрязнение довольно значительное — вероятно до глубины 100 см.

Таблица 2

Проникновение загрязненности при фильтрации в песок

Крупность зерен песка, мм	Глубина слоя песка, см	Загрязненность, % от веса насадки	Органические вещества, % от веса насадки	Количество кишечных палочек в 1 г песка естественной влажности	Общее количество бактерий в 1 л песка естественной влажности
0,85	0—3	15,9	3,64	71—81	320—336
	4—5	1,83	0,64	6—8	256—264
0,25	0—1	14,28	5,17	190	259
	2—3	0,40	0,23	90	—
	3—5	0,40	0,24	32	150
	115	0,38	0,21	3	49
	275	0,10	0,08	0	37

Результаты лабораторных исследований (Берданов, 1971) по инфильтрации воды и наблюдения на опытном инфильтрационном бассейне в г. Курске показали близкую их сходимость по коагуляции и по улучшению качества воды (токсичных компонентов, ПАВ и пестицидов в воде не было).

Более детально вопрос об изменении качества речной воды при ее фильтрации через пески с эффективным диаметром 0,84—0,25 мм при глубинах 2,5—3 м и в зависимости от продолжительности лабораторных опытов (фильтроцикл до 112 сут) освещен в работе В. М. Берданова (1973). На рис. 25, 26, 27, 28 приведены изменения мутности, цветности, содержания кислорода и углекислоты, а также изменение бактериологических показателей по глубине (см. рис. 26, 27, 28 $\frac{C}{C_p}$ — отношение содержания компонентов — улучшенного к первоначальному). Интересно отметить, что при значительных колебаниях мутности воды (0,5—39 мг/л) после фильтрации через трехметровый слой песка с d_3 , равным 0,6 и 0,25 мм, мутность оставалась практически постоянной и, в общем, удовлетворяла требованиям ГОСТ 2874—73. Цветность после фильтрации через трехметровый слой песка с $d_3 = 0,25$ мм и 0,6 мм через 20 дней снижалась соответственно до 29 и 40% от первоначальной, которая колебалась в пределах 25—87 градусов (см. рис. 26).

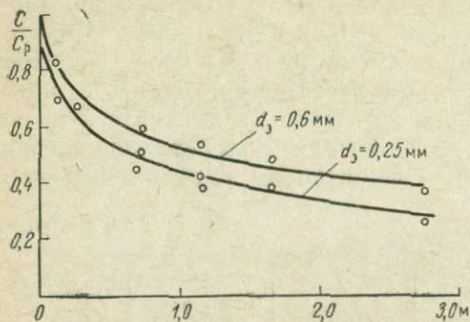


Рис. 26. Изменение цветности воды р. Сходни при фильтрации через песчаную загрузку за 20 сут

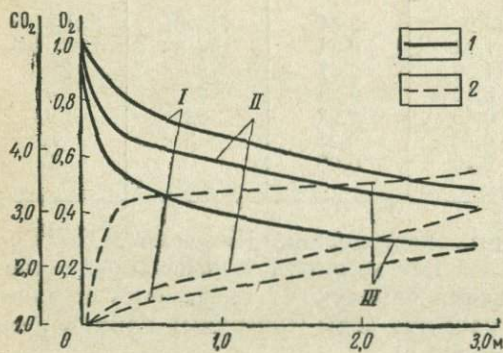


Рис. 27. Изменение содержания кислорода (1, доли единицы) и свободной углекислоты (2, м/г) по глубине загрузки (при $d_3 = 0,85$ мм).

I, II, III — периоды наблюдений в конце фильтроцикла

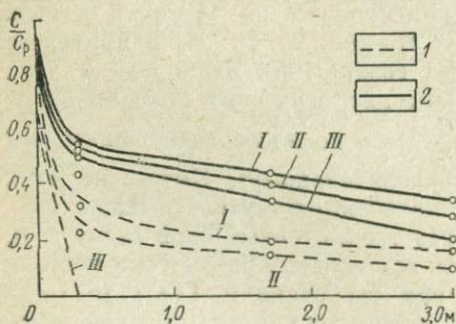


Рис. 28. Изменение содержания бактерий по глубине загрузки при $d_3 = 0,85$ мм.

1 — коли-индекс; 2 — общий счет бактерий в 1 мл; I, II, III — периоды наблюдений по 30 сут

Уменьшение содержания растворенного кислорода и увеличение растворенной углекислоты при загрузке песком $d_s = 0,85$ мм резко происходило до глубины 20—40 см, на глубине 3 м содержание растворенного кислорода уменьшилось до 28—48% от первоначального (в среднем 8 мг/л), а свободной углекислоты увеличилось в 2,5—3,8 раза от первоначального (1,7—5,0 мг/л) (см. рис. 27).

Содержание бактерий при трех периодах наблюдений (последовательно по 30 сут) (см. рис. 28) при фильтрации через песок с $d_s = 0,85$ мм уменьшалось быстрее в слое в 20 см — до 54—60% от первоначального содержания и медленнее в слое в 3,0 м — до 21—30% от первоначального. Коли-титр при первых периодах наблюдений после фильтрации через трехметровый слой уменьшился (улучшился) до 10—17% от первоначальной величины (коли-индекс порядка 3000).

Из приведенных рисунков видно, что с уменьшением эффективного диаметра зерен песка и при увеличении продолжительности фильтроциклов с одновременным увеличением кольматации и в особенности пленки несколько интенсифицируется улучшение качества воды.

Из опытов В. М. Берданова и других можно сделать некоторые выводы.

1. При фильтрации в песках значительно снижаются мутность, цветность, БПК, коли-индекс, общее число бактерий и уменьшается окисляемость.

2. Уменьшается содержание растворенного кислорода и увеличивается содержание углекислоты.

3. Такие показатели, как общая минерализация, содержание S^- , SO_4^{2-} , щелочность и жесткость практически не изменяются.

4. Наибольший относительный эффект очистки, в особенности по уменьшению мутности и содержанию бактерий, отмечается в верхнем слое песка до глубины 15—50 см.

5. Очень большое значение для очистки воды имеет кольматация верхнего слоя (3—5 см) и затем образование пленки из взвеси в воде. Образовавшаяся пленка и сильно закольматированный слой (до 3—5 см с загрязненностью до 16%) работают так же, как механическое тонкое сито с большими сопротивлениями при движении воды.

6. Цветность, обусловленная гуминовыми веществами, снижается практически полностью; а цветность, обусловленная фульвокислотами, изменяется мало.

7. Снятие пленки значительно ухудшает качество очистки в начале следующего фильтроцикла.

8. Гранулометрический состав песка при $d_s = 0,25—0,85$ мм практически мало влияет на степень очистки воды, в особенности после образования пленки; с уменьшением крутизны песка очистка воды по бактериальным и некоторым органолептическим

показателям несколько улучшается. При увеличении эффективного диаметра зерен (более 1—2 мм) степень очистки, вероятно, ухудшается.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ИНФИЛЬТРАЦИОННОМ БАССЕЙНЕ (ДО ИНФИЛЬТРАЦИИ)

Инфильтрационные бассейны устраиваются обычно открытые; поэтому они подвержены действию атмосферных факторов, изменчивых во времени (температура, солнечный свет и др.). Пуск воды в бассейн бывает сосредоточенный и рассредоточенный даже с дождеванием. В инфильтрационные бассейны поверхностная вода, часто загрязненная в разной степени, может поступать с мутностью до 10—20 мг/л и более.

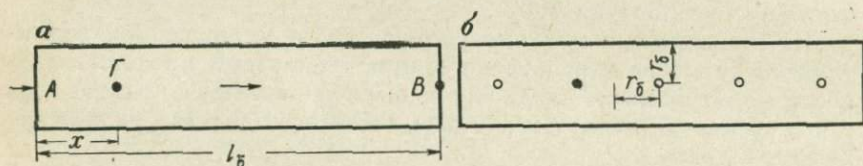


Рис. 29. Схема поступления и движения воды в бассейне.

а — сосредоточенное поступление воды с одного конца; б — рассредоточенное поступление воды

Рассмотрим влияние горизонтальной скорости воды в бассейне в зависимости от метода впуска воды (рис. 29). Пусть вода движется в бассейн (рис. 29, а) от точки А к В; глубина наполнения бассейна $h_б$ и средняя скорость фильтрации v_n . Тогда средняя горизонтальная скорость v_r в зависимости от расстояния x от места впуска воды определяется по формуле

$$v_r = \frac{v_n}{h_б} (l_б - x). \quad (IV.2)$$

Время пребывания воды t_x в бассейне вычисляется по формуле

$$t_x = 2,3 \frac{h_б}{v_n} \lg \frac{l_б}{(l_б - x)}. \quad (IV.3)$$

При $h_б/v_n = 0,5$ и $x = 0$ получим $v_r = 0,5l_б$, а при $x = l_б$ горизонтальная скорость $v_r = 0$, т. е. v_r изменяется от весьма значительной величины до нуля. Если $h_б/v_n = 0,5$, время пребывания воды при приближении к точке В (см. рис. 29, а) при $x = 0,9l_б$ составляет 4,6 сут. При этом время пребывания воды в бассейне не зависит от длины бассейна, а скорость значительно зависит от этой длины, например, если вода будет поступать из пяти точек (см. рис. 29, б), то максимальная горизонтальная скорость v_r уменьшится в 10 раз по сравнению с v_r на схеме (рис. 29, а).

Для взвеси с частицами диаметром 0,01—0,001 мм их гидравлические величины при 10° С имеют значения соответственно приближенно 0,15—0,0015 мм/с 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 скорости) порядка 0,15—15 сут. Кроме того, при горизонтальном движении воды следует учитывать вертикальную составляющую (около 0,083—0,05) от горизонтальной скорости. При длине бассейна 100 м, глубине воды 2 м и скорости инфильтрации 1 м/сут при впуске воды с одного торца бассейна вертикальную составляющую скорости от горизонтальной около места впуска получим 4,2—2,5 м/сут.

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

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

По данным В. А. Клячко и И. Э. Апельдина (1971 г.), при тех же скоростях осажается некоагулированной взвеси 10% и 85%, что соответствует, очевидно, разным условиям (состав взвеси, температура, горизонтальная скорость и др.).

Радикально можно резко улучшить равномерное распределение осаждения мути при дождевании (см. рис. 29, б); величину r_0 можно принимать около 10—20 м. В этом случае будет получена 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) нужно заменить другим методом распределения воды, например, при помощи сегнорова колеса близ поверхности воды.

Содержание растворенного кислорода в воде, поступающей в бассейны, обычно близко к полному насыщению. Из рис. 30 видно, что при аэрации (на впуске в бассейн) содержание 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 в большинстве инфильтрационных бассейнов довольно значительная часть воды находится больше двух суток и при этом со значительным содержанием кислорода, то отмирание бактерий в бассейне должно быть значительным. Одновременно идет увеличение содержания углекислоты и понижение рН. Развитие водорослей существенно влияет на ряд процессов. В результате фотосинтеза днем выделяется кислород, даже с перенасыщением воды до 14—15 мг/л и более при 18—20° С (по данным В. М. Бердапова и других), а также улучшается бактериальная очистка воздействием водорослей, в частности сине-зеленых. Влияние микроводорослей на улучшение качества воды показано в работах А. В. Доливо-Добровольского и др. (1960—

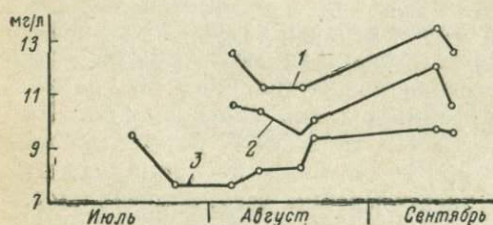


Рис. 30. Изменение содержания кислорода в инфильтрационном бассейне.

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

1975 г.). Одновременно отмирание водорослей вызывает дополнительную нагрузку на окисление и может ухудшить качество воды — появятся неприятные запах и вкус.

За последние 10—15 лет на некоторых инфильтрационных бассейнах начали высевать камыш-кугу, рогоз широколистный и другие водные растения с целью улучшения очистки воды. По данным немецких исследователей, камыш разрыхляет грунт, увеличивая его фильтрационные свойства в бассейнах, поглощает хлор, фенол и другие вещества. Исследования фильтрационных бассейнов с камышом ведутся в Крифельде, Дрездене.

В последнее время 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 (лещ, окунь, карп и др.) в бассейнах и прудах (Висбаден в ФРГ, Познань в Польше 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 приходится производить очистку от ила (пленки) раз в год. Уход за камышом производится вручную и пока обходится дорого, но способ с камышом перспективный.

Повышение температуры воды влечет за собой увеличение интенсивности окисления и роста водорослей. Освещенность воды не только определяется сменой дня и ночи, но и зависит от облачности и мути воды. Увеличение освещенности улучшает развитие водорослей и вызывает отмирание ряда бактерий.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРИ ИНФИЛЬТРАЦИИ В БАСЕЙНЕ И В ЗОНЕ АЭРАЦИИ ПОД БАСЕЙНОМ

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

1) фильтрующим материалом в бассейнах служат естественные грунты, реже с подсыпкой сверху песка;

2) инфильтрационные бассейны — сооружения открытого типа, подверженные непосредственному воздействию атмосферных условий;

3) инфильтрационные бассейны в системе искусственного восполнения являются предпоследним этапом в улучшении качества перед водоносным горизонтом, в то время 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.

Весьма существенную роль при улучшении качества воды играет пленка. При фильтрации через пленку задерживаются взвешенные вещества и большинство микроорганизмов; кроме того, в пленке адсорбируется ряд растворенных веществ, и в частности токсичных и нежелательных.

По данным Е. И. Моложавой (1976 г.), при незначительном содержании в воде нефтепродуктов и канцерогенов на уровне ПДК они задерживаются пленкой частично и 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; для фага *E. Coli* и клостридии этого не наблюдается.

По данным Л. А. Христиановой и С. Н. Чекалюка (1976 г.), в инфильтрационных бассейнах в г. Риге через слой песка 40 см (вероятно, и пленки) поступало в подземные воды 32% клеток фитопланктона, а в опытной установке г. Курска в скважинах водозабора в 30 м от инфильтрационного бассейна обнаружилось 1—3% клеток водорослей (20—30 клеток/мл) от содержания в бассейне.

Интересные сведения о влиянии зоны аэрации на очистку воды приводятся 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 бактерий *B. Coli* при этом была около месяца. При заражении водоносного горизонта микробами *B. Coli* выживаемость их была около 3,5 месяца. Данные работ США об очистке вод в зоне аэрации аналогичны приведенным данным из работ Г. А. Шина.

При наличии пленки и кольтматации нижележащих песков происходит значительное улучшение качества воды. Однако известны случаи, когда в Новокузнецке (Берданов, 1973; Порядин, 1971) при подаче мутной воды загрязнения проникли в гравийный слой на глубину 1,6 м, в связи с этим пришлось снять закольтмированный слой и насыпать сверху мелкий песок. В Ивано-Франковске 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 определено об улучшении качества воды при фильтрации через дно бассейна в зоне аэрации можно судить по опытам в натуре для конкретных условий.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ

Водоносный горизонт, приуроченный к не крупным пескам, способен улучшать качество подземных вод, что определяется физико-механическими, а также частично биологическими процессами и разбавлением воды. В большинстве случаев пресные подземные воды являются неблагоприятной средой для развития микроорганизмов, и в частности патогенных. Однако в некоторых случаях в подземных водах, приуроченных к пескам, встречаются случаи массового развития организмов (бактерий, водорослей и даже простейших микроскопических животных), при этом в 1 мл число клеток доходит до десятков тысяч и более. В подземных водах наблюдаются также случаи обнаружения только бактерий (даже патогенных). В водоносных горизонтах может происходить процесс задерживания различных организмов в результате их прилипания к породе (более вероятно адгезии), а также под влиянием неблагоприятных условий (процесс отмирания). Следует отметить, что наряду с процессом прилипания организмов может происходить и отлипание их.

Исходя из теоретических данных, приведенных в работе Д. Г. Звягинцева (1973) и других, можно сделать вывод, что количество микроорганизмов в пресной подземной воде может быть значительно меньше, чем развивающихся на поверхностях водовмещающих пород (песок и др.), так как на указанных поверхностях условия для организмов могут оказаться более благоприятными, в частности по питанию.

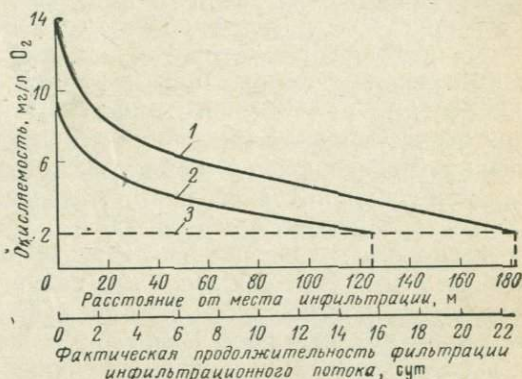
П. Е. Богомазовым (1972) приведены сведения об улучшении качества воды в одном водоносном горизонте при искусственной инфильтрации. По нашим данным, водоносный горизонт в рассмотренном случае приурочен к среднезернистым (частично крупнозернистым) пескам мощностью около 25 м, с коэффициентом фильтрации примерно 30 м/сут и пористостью около 0,2. На

рис. 31, 32 приведены данные (по П. Е. Богомазову) о снижении окисляемости и содержания бактерий в зависимости от расстояния и времени пребывания воды в пласте.

Для первого случая в исходной воде (в начале) общее число бактерий было 40 200 в 1 мл, титр-коли 0,001 и окисляемость

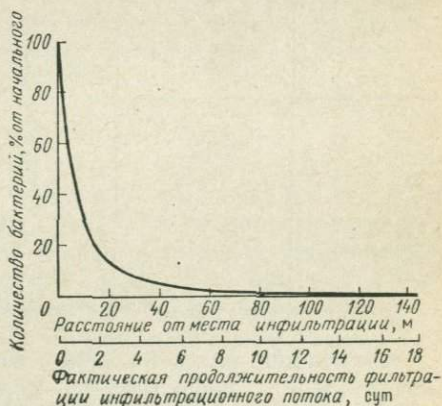
Рис. 31. Снижение окисляемости воды озера при фильтрации в среднерезнистых песках.

1 — окисляемость для первого случая; 2 — то же для второго случая; 3 — то же для естественного потока (только расстояния).



14 мг/л (O₂), т. е. вода была загрязненная. На расстоянии 135 м титр-коли был 300, число бактерий 2 в 1 мл и окисляемость 3,6 мг/л (O₂), т. е. вода соответствовала уже ГОСТ 2874—73 и водоносный горизонт хорошо улучшал качество воды. На рис. 31 и 32 действительное время пребывания воды в водоносном пласте,

Рис. 32. Снижение содержания бактерий в воде озера при фильтрации в среднерезнистых песках



вероятно, занижено. По данным Рихерта (Н. А. Плотников, 1938), в Швеции в Гётеборге при искусственном восполнении подземных вод в гравийно-галечниковых отложениях при движении воды со скоростью 2,2 м/сут на расстоянии около 200 м число бактерий уменьшилось с 500—8000 в 1 мл до нуля.

По лабораторным данным Е. И. Моложавой (1976 г.), «При поступлении с речной водой небольших концентраций органических загрязнений на уровне ПДК и кратковременном повышении

до 2—3 ПДК происходит полная задержка пестицидов (ДДВФ), нефтепродуктов и канцерогенов и постепенное накопление их в фильтрующем грунте». Подобные данные приводятся по солям металлов. Соли разных металлов сорбируются в водонесных песках неодинаково. Соединения ртути задерживаются в водоносных песках значительно хуже. Соединения хрома на уровне 10 ПДК в исходной воде не задерживаются в водоносных песках.

По некоторым зарубежным данным, в водоносном горизонте задерживаются фенолы (при исходных концентрациях меньше 0,003 мг/л) и ряд токсичных веществ. По данным Тейлора (1958 г.), при искусственном восполнении в дюнах Голландии была использована грязная вода р. Рейна с высоким содержанием вредных веществ (табл. 3). В среднем содержание токсичных элементов (см. табл. 3) снижалось в 1,5—11 раз, т. е. значительно. Хотя мы не располагаем данными, на каких этапах произошло это снижение, но самый факт снижения весьма показателен. Однако пока до фундаментальных опытов на значительное снижение вредных и неприятных для вкуса элементов в инфильтрационном бассейне и в водоносном горизонте рассчитывать не следует.

Таблица 3

Снижение содержания токсичных элементов (в мг/л)
при искусственном восполнении в Голландии

Элементы	Вода р. Рейна		Подземная вода в водозаборах	
	Колебания (1968 г.)	Среднее (1963—1968 гг.)	Колебания	Среднее
Хром	1—17	9	1—1	1
Свинец	5—49	19	4—5	4
Медь	8—28	14	2—9	5
Цинк	27—248	155	2—22	14
Ртуть	0,1—1,5	1,4	0,5—1	0,5—1,0
Мышьяк	5—15	9	1,2—2,5	2
Селен	3—9	6	0,0—6	4

Улучшение качества воды, получаемой из водозаборов при искусственном восполнении, может происходить в результате смешения воды, поступающей при инфильтрации в водоносный горизонт, с естественной подземной водой. Улучшение качества инфильтрующейся воды в водоносном пласте может происходить за счет сорбции токсичных, общесанитарных и органолептических компонентов. Теоретически это может решаться по известным уравнениям массопереноса.

Получение необходимых параметров водоносного слоя для решения поставленных задач по сорбции и десорбции практически возможно, но с учетом, что не изменяются, например, однород-

ность водоносного слоя не только по фильтрационным свойствам, но и по взаимодействию породы и воды, постоянство состава поступающей воды и температуры, а также с учетом других условий, влияющих на процессы сорбции. Кроме того, при наличии нескольких активных компонентов значительно усложняются решения.

Однако, несмотря на трудности для рассматриваемых условий искусственного восполнения подземных вод решения задач массопереноса для оценки изменчивости качества воды, следует практически разрабатывать для конкретных условий — сначала, конечно, наиболее простых.

На семинаре в Москве в 1976 г. А. Е. Орадовская и М. И. Гольдин отметили барьерную роль системы искусственного восполнения подземных вод по отношению к микрозагрязнению. Анионо-активные ПАВ, неорганические фосфаты, фенолы, растворимые нефтепродукты интенсивно десорбируются при поступлении чистой воды.

Отсюда можно сделать вывод о неустойчивости сорбции указанных компонентов при снижении их концентрации в воде, а также о значительной сорбции при кратковременном значительном повышении концентрации компонента, т. е. водоносный слой при искусственном восполнении может играть при соответствующих условиях барьерную роль защиты от резких повышений концентраций вредных и других компонентов. Важную роль здесь играет расстояние от места инфильтрации воды до водозабора подземных вод: чем больше расстояние, тем выше барьерное действие. Но увеличивать расстояние следует с учетом технико-экономических соображений, так как увеличение расстояния или снижает расход, или увеличивает в итоге стоимость воды. Для практических решений надо также использовать теорию массопереноса, но с обязательными опытами в натуре.

С учетом вышеприведенных данных для каждого конкретного случая следует проводить соответствующие исследования в полевых условиях. В зависимости от минерального состава песков, свойств воды, скорости движения ее, времени пребывания, концентраций веществ (и их изменений), а также комплекса этих веществ задерживающая способность водоносных песков и результаты смешения воды из разных источников подпитывания вод меняются.

ТЕМПЕРАТУРА ИСКУССТВЕННО ВОСПОЛНЯЕМЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

После искусственного восполнения подземных вод из реки получается температура, обычно близкая к температуре естественных подземных вод. При значительных колебаниях температуры поверхностных вод (18—25° С) изменения температуры восполняемых подземных вод составляют 1—11° С, но чаще 2—8° С (табл. 4).

Изменение температуры искусственно восполняемых подземных вод

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

Изменение температуры подземных вод зависит от температуры поверхностных вод, расстояния, времени пребывания в водоносном слое и других условий.

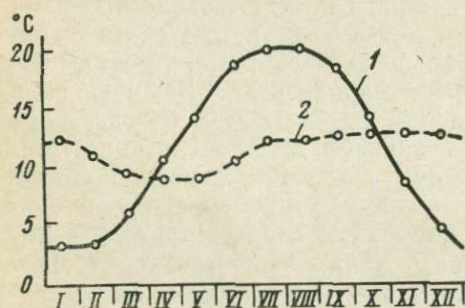


Рис. 33. Изменение температуры воды р. Рейна (1) и искусственно восполняемой подземной воды (2) в Висбадене

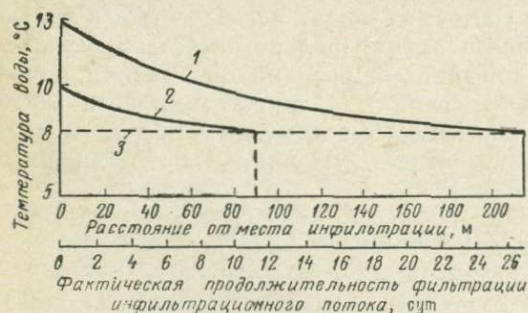


Рис. 34. Изменение температуры воды при фильтрации в среднезернистых водоносных песках (по П. Е. Богомазову). 1 — для первого случая; 2 — для второго случая; 3 — для естественных условий (только расстояния)

На рис. 33 показано колебание температуры в течение года поверхностных вод р. Рейна и получаемых подземных вод в Висбадене. Поверхностные воды р. Рейна имеют колебания 17°C , а искусственно восполняемые подземные воды всего 5°C . Изменение

температуры поверхностной воды при фильтрации в водоносных песках показано на рис. 34. На расстоянии 90—215 м (см. рис. 34) поверхностная вода по температуре уже сравнялась с подземной. Это — одно из преимуществ искусственно восполняемых подземных вод в гигиеническом отношении (зимой вода не очень холодная, а летом не теплая).

ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ВОДЫ, ПОДАВАЕМОЙ ДЛЯ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПОЛНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Требования к качеству источника искусственного восполнения подземных вод определяются характером потребности, рядом природных и санитарных условий, возможностями улучшения качества воды при инфильтрации в водоносный горизонт, улучшением качества воды в самом водоносном горизонте, а также техническими условиями и экономическими возможностями. Может иметь значение величина потребности в воде и распределение ее в течение года. Кроме того, важное значение имеют схема искусственного восполнения в целом, а также потребные и возможные емкостные запасы подземных вод. И, наконец, требования к качеству воды, подаваемой для восполнения, определяются возможностями иметь источник с необходимым качеством воды. Если источник восполнения подземных вод не удовлетворяет требуемому качеству воды для искусственного восполнения, то вводится дополнительная предварительная очистка воды.

При устройстве инфильтрационных скважин, особенно в трещиноватых породах, вода, подаваемая для искусственного восполнения в скважины, должна отвечать, как правило, требованиям ГОСТ 2874—73. В воде для подачи в скважины при инфильтрации в песках недопустима мутность более 1 мг/л; а также наличие планктонных организмов, так как в противном случае будут засоряться скважины. Несколько большая мутность допускается при нагнетании в сильно трещиноватые и кавернозные породы. Кроме того, очень важно, чтобы подаваемая для инфильтрации в скважины вода при смешении с естественной водой в пласте не вызывала осадка. При устройстве инфильтрационных бассейнов вода может: 1) отвечать требованиям работы таких бассейнов и 2) не отвечать таким требованиям.

Для оценки качества воды, подаваемой на инфильтрационный бассейн, в первом случае в основном можно пользоваться табл. 5, приведенной из «Временных указаний по эксплуатации систем искусственного пополнения запасов подземных вод с инфильтрационными бассейнами» (1972).

Требования к качеству воды в табл. 5 по вредным веществам соответствуют ГОСТ 2874—73, кроме меди (3 мг/л вместо 2 мг/л) и фосфатов (1 мг/л вместо 3,5 мг/л), вероятно, имеется в виду PO_4 . Для фосфатов это определяется, видимо, тем, что наличие фосфатов более 1 мг/л благоприятно для развития синезеленых

Допустимое качество воды, поступающей в инфильтрационный бассейн

Показатели	Предъявляемые требования (не более)	Примечание
Мутность, мг/л	20 (при грунтах с $d_3 = 0,5-1$ мм) и 10 (при грунтах с $d_3 = 0,15-0,3$ мм)	При количестве чисток бассейнов не более двух в год
Цветность, градусы	60 при 50%-ном содержании гуминовой цветности и 40 при меньшем ее содержании с учетом разбавления естественными водами	Рассчитывается при проектировании
Органические вещества по окисляемости O_2 , мг/л		
перманганатная	15	
бихроматная	30	
Бактериальные загрязнения, коли-индекс	10 000 (при грунтах $d_3 = 0,15-1,0$ мм)	
Общий счет бактерий	1000-5000	
Компоненты, мг/л:		
Железо	3	
Фенолы	0,001	Кратковременно до 0,005
ПАВ (поверхностно-активные вещества)	0,5	
Нефть	0,3	
Свинец	0,1	
Медь	3,0	
Мышьяк	0,05	
Цинк	5	
Фосфаты	1	
Хлориды	Диктуется степенью разбавления с естественными грунтовыми водами	Рассчитывается при проектировании
Сульфаты		
Жесткость общая, мг-экв/л		

водорослей, которые, в частности, ухудшают вкус воды. Требования, предъявляемые к качеству воды (см. табл. 5), подаваемой в инфильтрационный бассейн, для конкретных условий можно несколько снижать, но это надо обосновать.

По токсичным и другим веществам, не включенным в табл. 5, в общем случае следует принять требования ГОСТ 2874-73, с учетом сделанных ранее замечаний. Если вода не отвечает этим требованиям в инфильтрационном бассейне и водоносном горизонте, то необходимо ее предварительное улучшение.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ВОДОПОДГОТОВКА

В ряде случаев при инфильтрационных бассейнах для всех поглощающих скважин при мутности воды более 1-2 мг/л и редко для инфильтрационных сооружений простейшего типа (затопление

простое, обваловывание, пруды и пр.) требуется предварительное улучшение поверхностных вод. Принципы улучшения качества воды при предварительной водоподготовке для подачи на инфильтрационные сооружения искусственного восполнения подземных вод аналогичны улучшению качества воды на очистных сооружениях для водопроводов, но отличаются по задачам, а в некоторых случаях по конструкции сооружений. Задачей обычного улучшения качества воды на водопроводах является получение воды, соответствующей качеству по ГОСТ 2874—73 и не содержащей вредных веществ, а в задачу предварительной водоподготовки при искусственном восполнении входит частичное улучшение качества воды, которое требуется для дальнейшей очистки на инфильтрационных сооружениях и в водоносном горизонте. Когда инфильтрация производится через поглощающие скважины, то требования к качеству воды повышаются обычно до уровня кондиций ГОСТ 2874—73. В предварительную водоподготовку в соответствии с исходным качеством воды и требованием к его улучшению могут входить следующие методы: аэрация, отстаивание, микрофильтрация, 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 др.

Чаще всего дополнительное улучшение качества воды делается до инфильтрационных сооружений, но иногда и после прохождения воды через водоносный горизонт.

Аэрация. Для того чтобы в инфильтрационных бассейнах и в водоносном горизонте происходило наиболее полное окисление и разложение органического вещества и уничтожение бактерий, необходимо максимальное насыщение воды кислородом. Растворимость кислорода воздуха в воде на 1 л при атмосферном давлении составляет: при 0° С 10,19 см³, или 14,5 мг/л; при 10° С 8,84 см³, или 12,4 мг/л; при 20° С 6,36 см³, или 8,8 мг/л, и при 30° С 5,25 см³, или 7,4 мг/л.

Из приведенных данных видно, что полное насыщение воды кислородом падает в два раза при повышении температуры от 0 до 30° С. Однако, хотя количество кислорода при повышении температуры воды понижается, активность процессов окисления повышается. Задача аэрации будет выполнена, если кислорода достаточно для окисления имеющихся в воде органических соединений и уничтожения микробов до норм. При этом следует иметь в виду, что не все органические вещества достаточно хорошо окисляются. Аэрация производится путем подачи воды по каскадам (Дортмунд, ФРГ; Круасси, Франция), через разбрызгиватели, например, типа насадок Вентури в Крифельде, путем простого разлива из трубы в г. Риге. В некоторых случаях, например в зимнее время, аэрация может производиться путем поступления воздуха во всасывающую трубу при помощи компрессора

или путем эжекции в напорной трубе. Наибольший дополнительный захват кислорода из воздуха при обычной аэрации достигает 5—8 мг/л. Во время пребывания в открытом отстойнике и в инфльтрационных бассейнах (см. рис. 29, а) вода дополнительно аэрируется воздухом (до 2—5 мг/л). Кроме того, при наличии растительного планктона с хлорофиллом и высших растений в бассейне днем происходит также дополнительное насыщение кислородом.

Отстаивание — наиболее часто встречающийся вид предварительной водоподготовки — применяется чаще как предварительный процесс улучшения качества воды перед фильтрованием. Сооружения для отстаивания выполняются обычно горизонтального типа в виде ковшей (на р. Лек для водоснабжения в Гааге, на р. Нерис для водоснабжения г. Вильнюса, на р. Арагви для водоснабжения г. Тбилиси), запруд (на р. Млынивке для водоснабжения г. Ивано-Франковска), открытых, вырытых в грунте отстойников, реже капитального типа с облицованными стенками на старых установках искусственного восполнения подземных вод (ГДР и ФРГ). Отстаивание происходит также в водохранилищах, озерах (Магдебург в ФРГ, Онтарио в Канаде, Рига в СССР) и прудах, которые могут являться источниками восполнения подземных вод. Задерживание взвешенных веществ в отстойниках для разных условий примерно равно 30—80%, а иногда и более от первоначальной величины. По различным данным снижение числа бактерий в отстойниках составляет примерно 25—80%; зимой несколько меньше, чем летом. В отстойниках до подачи в инфльтрационные бассейны в Черновицах задерживалось до 80% бактерий. Прилипание коагулянта при отстаивании может интенсифицировать задерживание взвешенных частиц веществ до 92,5% и бактерий до 90%.

Микрофилтрация применяется как самостоятельный метод или в комплексе с другими видами очистки для задерживания грубой взвеси и особенно там, где в источнике искусственного восполнения наблюдается интенсивное развитие планктона при содержании более 1000 клеток в 1 см³ при продолжительности цветения не менее месяца (В. А. Клячко, И. Э. Апельцин, 1971 г.). Но при искусственном восполнении подземных вод использование микрофильтров может оказаться целесообразным и при меньшем содержании клеток планктона в 1 см³. Микрофильтры задерживают примерно до 75% диатомовых и до 90% синезеленых водорослей. При этом (по Б. Хинтеру) удаляется до 10—20% бактерий и БПК снижается на 5—10%. Кроме того, задерживается до 25—35% взвешенных частиц.

Скорое фильтрование при искусственном восполнении для предварительной водоподготовки применяется как самостоятельный метод, так и в комплексе с другими методами. Для подачи на инфльтрационные бассейны улучшение качества воды производится частично в соответствии с требованиями.

В ряде случаев в воду предварительно добавляют коагулянт и производят ее хлорирование; на некоторых установках коагулирование и хлорирование производится периодически. При фильтровании без коагулирования мутность снижается на 60—80% и более, цветность на 5—20% и окисляемость на 8—22%, улучшение коли-индекса составляет 30—75% и общего счета колоний — 40—50%. При искусственном восполнении в г. Базеле загрязненная вода р. Рейна в количестве 240 тыс. м³/сут сначала очищается на скорых фильтрах, а затем уже поступает в инфильтрационные бассейны (Casati, Metofer, 1965).

Предварительные фильтры, как и отстойники, должны получить наибольшее применение при искусственном восполнении для снижения мутности перед подачей в инфильтрационные бассейны. В таких фильтрах применяется песок диаметром 1—2 мм. Для снижения мутности принимаются скорости фильтрации: при мутности 200—250 мг/л — 2,5 м/ч; при 100—200 мг/л — 3 м/ч и при 100 мг/л — 5 м/ч. Контактные осветители с коагулянтом снижают мутность и цветность до требований ГОСТ 2874—73 и окисляемость до 40—60%, при этом коли-индекс улучшается на 86—99,6%. Контактные осветители применяются для существенного улучшения качества воды (без удаления токсичных соединений).

Хлорирование в системе предварительной водоподготовки применяется как самостоятельный метод, так и в комплексе с другими. Хлорирование проводится с целью обеззараживания, для борьбы с ростом водорослей и в качестве окислителя органических веществ и, в частности, веществ, обуславливающих цветность, запахи и привкусы (для их снижения и даже устранения). 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 хлорировании снижается цветность на 30—60%, окисляемость на 10—40%, прекращается развитие планктона, улучшаются коли-индекс и общий счет колоний. В ряде случаев при положительном влиянии хлорирования на улучшение качества воды следует учитывать, что в соответствующих условиях хлорирование вызывает неблагоприятные последствия. Например, при наличии фенола в воде возникают неприятные привкусы и запахи. При значительном содержании аммиака могут образоваться хлорамины; при этом замедляется распад органического вещества. Таким образом, хлорирование следует применять, взвесив его возможные неблагоприятные последствия.

Удаление из воды токсичных веществ. При наличии больших, чем по норме, концентраций токсичных, канцерогенных и других нежелательных веществ следует предусматривать специальное улучшение качества воды. Принципиально ряд таких веществ удаляется из воды не очень сложными методами (например, свинец, медь, цинк, барий, уран, ртуть); другие

осаждаются при подщелачивании известью или фильтрованием через магномассовый фильтр, а некоторые (мышьяк и др.) более сложно. Канцерогены задерживаются активированным углем. Методы удаления вредных и нежелательных веществ описаны в работе В. А. Клячко и И. Э. Апельцина (1971 г.).

Предварительная водоподготовка сильно загрязненных вод. В настоящее время очистка воды 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 в соответствующих случаях вводится хлорирование, известкование и углевание для удаления привкусов и запахов в воде.

В районе Круасси (Франция) в качестве источника восполнения подземных вод используется сильно загрязненная сточными водами р. Сена (*Bize* и др., 1972), но примерно в августе — октябре искусственное восполнение прекращается, так как Сена слишком сильно загрязнена и эксплуатация идет за счет емкостных запасов подземных вод. Предварительная водоподготовка включает введение коагулянта и активированного угля, осветление в отстойниках, быструю фильтрацию, затем аэрацию по каскадам и подачу в инфильтрационные бассейны.

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ИХ ВОСПОЛНЕНИИ

Как указывалось, изменение качества подземных вод, отбираемых водозабором в условиях искусственного их восполнения, зависит от двух основных процессов: самоочищения при фильтрации поверхностных вод через породы и смешения их с естественными подземными водами.

Достаточно обоснованный прогноз влияния этих процессов является задачей большой сложности.

Опытные данные свидетельствуют о том, что степень естественной очистки воды в значительной мере зависит от коллекторских свойств пород и различна для песков, гравийно-галечниковых отложений, трещиноватых и закарстованных пород.

Наилучший эффект очистки загрязненной воды (исключая, конечно, химическое загрязнение неразлагаемыми соединениями, несорбируемыми металлами) достигается при фильтрации через мелкозернистые пески, на чем основана работа медленных фильтров. При этом основную роль при очистке играет образующийся в верхней зоне песка закольматированный слой и особенно илистый осадок. Масса загрязнений задерживается здесь на поверхности песка или в самом верхнем его слое. В илистом осадке интенсивно протекают процессы биохимического разложения органических соединений, фенолов, сорбция ряда тяжелых ме-

таллов. Окислительные процессы продолжаются и в зоне аэрации, поровое пространство которой насыщено воздухом, содержащим кислород.

Существенное влияние на выравнивание качества воды как на вертикальном, так и на горизонтальном участке фильтрации от бассейна до водозабора оказывают сорбционные процессы, рассеивание загрязняющих компонентов вследствие фильтрационной дисперсии пород, а также смешение инфильтруемых вод с чистыми подземными водами.

В результате этого некоторое защитное действие систем искусственного восполнения проявляется даже по отношению к ряду устойчивых к разложению микрозагрязнений — детергентам, пестицидам, растворимым нефтепродуктам, неорганическим фосфатам и слабосорбируемым тяжелым металлам.

Искусственное восполнение подземных вод через инфильтрационные бассейны в ряде случаев может использоваться в качестве эффективного метода предварительной очистки воды. Однако при этом необходимо учитывать персистентность к разложению в воде ряда химических загрязнений, их токсичность, а также опасность, связанную с возможным суммированием или потенцированием неблагоприятного действия при одновременном загрязнении исходной воды несколькими вредными химическими веществами (Е. И. Моложавая, 1976 г.).

При фильтрации через галечники или трещиноватые и закарстованные породы, обладающие меньшей очищающей способностью, загрязняющие компоненты источника восполнения могут проникать в водоносный горизонт на глубину, ухудшая показатели качества естественных подземных вод.

Общее уравнение изменений качества подземных вод при искусственном их восполнении имеет вид

$$C = C_0 \pm \Delta C_1 \pm \Delta C_2 \pm \Delta C_3 \pm \Delta C_4, \quad (\text{IV.4})$$

где C — концентрация вещества в воде, поступающей в водозабор;

C_0 — исходная концентрация вещества в воде, поступающей на искусственное восполнение;

$\pm \Delta C_1$ — изменения концентрации вещества в инфильтрационном сооружении в результате биохимического разложения, отстаивания, осаждения и т. д.;

$\pm \Delta C_2$ — то же, при просачивании через заиленный слой (илистый осадок и закольматированную зону пород);

$\pm \Delta C_3$ — то же, на вертикальном участке фильтрации в зоне аэрации грунтовых вод;

$\pm \Delta C_4$ — то же, на горизонтальном участке фильтрации в зоне полного водонасыщения пород.

Каждый из указанных этапов естественной очистки поверхностной воды обладает вполне определенным свойственным ему защитным действием по отношению к различным компонентам

и показателям качества воды, зависящим от протекающих в нем физико-химических и биологических процессов, и должен учитываться при обосновании искусственного восполнения подземных вод. Оценка изменений качества воды в инфильтрационном сооружении (например, в бассейне) и в заиленном слое может быть дана по фактическим наблюдениям в опытных сооружениях искусственной инфильтрации путем отбора и анализа проб воды, взятых в самом бассейне и под его днищем, ниже зоны закольматированных пород.

Прогноз качества воды при движении по водоносному горизонту от бассейна до водозабора может производиться аналитическими методами. При этом общий путь фильтрации рекомендуется принимать с учетом движения воды как на горизонтальном, так и на вертикальном участке фильтрации.

По характеру изменения в процессе фильтрации все физико-химические показатели качества воды могут быть разделены на две группы: мало изменяющиеся при инфильтрации и претерпевающие изменения в результате влияния сорбционных, окислительных и других процессов.

В общем случае прогнозная концентрация отдельного компонента в подземной воде, отбираемой водозабором, в результате только смешения с инфильтруемыми водами без учета процессов дисперсии и поглощения составит

$$C_b = \frac{C_0 \alpha_1 Q_n + C_e (Q_b - \alpha_1 Q_n)}{Q_b} \quad (\text{IV.5})$$

Если в формировании дебита водозабора принимает участие также фильтрация из реки, то концентрация того или иного компонента при условии одного смешения будет равна

$$C_b = \frac{C_0 \alpha_1 Q_n + C_p \alpha_2 Q_p + C_e (Q_b - \alpha_1 Q_n - \alpha_2 Q_p)}{Q_b}, \quad (\text{IV.6})$$

где C_b — прогнозная концентрация компонента в подземной воде, отбираемой водозабором;

C_0, C_p, C_e — концентрация данного компонента соответственно в поверхностной воде, находящейся в бассейне, в реке и в естественных подземных водах;

Q_b — намечаемая производительность водозабора;

$\alpha_1 Q_n$ — привлекаемый к водозабору расход, подаваемый на инфильтрацию;

$\alpha_2 Q_p$ — привлекаемый к водозабору фильтрационный расход из реки.

Величины привлекаемых при эксплуатации различных источников формирования дебита водозабора αQ определяются гидродинамическим методом для конкретных граничных условий,

систем искусственного восполнения и типов водозаборов. Так как расход воды, подаваемой на инфильтрацию в бассейны или в поглощающие скважины, устанавливается по фактическим замерам или может прогнозироваться по аналитическим зависимостям, а производительность водозабора и химический состав поверхностных и подземных вод в их естественном состоянии определяются также по фактическим данным, то оценка изменения качества подземных вод с учетом лишь процесса смешения является достаточно надежной по таким показателям, как общая минерализация, жесткость, содержание сульфатов, хлоридов, фтора, тяжелых несорбируемых металлов и других минерализующих компонентов, мало изменяющихся при фильтрации. В то же время по ряду физико-химических и санитарно-гигиенических показателей, претерпевающих существенные изменения при фильтрации воды, таких, как мутность, цветность, окисляемость, бактериологические показатели, содержание фенолов, железа и других, применение формул смешения для оценки качества подземных вод при их искусственном восполнении может дать недостоверные результаты.

Для прогноза изменений в процессе инфильтрации содержания отдельных компонентов некоторыми исследователями предложены эмпирические зависимости, учитывающие эффект очистки воды по пути движения в зависимости от скорости инфильтрации и других факторов. В. С. Усенко (1972) на основе экспериментов, проведенных в ФРГ по снижению в процессе фильтрации содержаний O_2 , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ и химическому потреблению $KMnO_4$, рекомендует эмпирическую формулу, позволяющую рассчитать концентрацию того или иного легкоокисляющегося ингредиента по мере погружения воды в грунт

$$C = \alpha e^{\frac{\beta h}{v}} + \gamma, \quad (IV.7)$$

где α , β , γ — параметры, определяемые экспериментальным путем;

h — глубина взятия пробы, м;

v — скорость инфильтрации, м/ч;

C — концентрация компонента, мг/л.

Для прогноза концентрации кислорода по глубине им же предложена эмпирическая формула

$$C = \alpha (hv)^2 + \beta (hv) + \gamma. \quad (IV.8)$$

Важные в практическом отношении эмпирические зависимости получены при экспериментальных исследованиях процесса естественного самоочищения поверхностных вод при искусственном восполнении в ГДР (Zöfler, Pietsch, Huhn, 1973).

Для расчета гидравлического ослабления (выравнивания) пиков концентраций устойчивых к разложению загрязнений (без

учета ограниченной сорбционной емкости пород и процессов десорбции) ими рекомендована эмпирическая формула

$$C = C_0 \cdot 11 \frac{(t_k v_r)^{0,95}}{Z}, \quad (\text{IV.9})$$

$$t = 0,9 \left(\frac{Z}{v_p} \cdot \frac{t_k}{2} \right), \quad (\text{IV.10})$$

где

$$v_r = v \frac{B}{h} \text{ и } v_p = \frac{v_r}{n}; \quad (\text{IV.11})$$

C — прогнозная величина пика концентрации загрязняющего вещества в воде водозабора, мг/л;

C_0 — импульс концентрации загрязнения в исходной сырой воде, мг/л;

t — время пребывания в водоносном горизонте до поступления загрязнения с концентрацией C в водозабор, сут;

Z — общий путь фильтрации, м;

t_k — продолжительность скачка концентрации, сут;

v_r — скорость фильтрации относительно модели ленты тока, м/сут;

v — скорость просачивания, м/сут;

v_p — действительная скорость движения воды в порах, м/сут;

n — пористость;

B — ширина площади инфильтрации, м;

h — средняя мощность водонасыщенной зоны пород, м.

Общее уравнение уменьшения в воде количества органических веществ при просачивании через породу имеет вид (Zöfler, Pietsch, Huhn, 1973)

$$\Delta p v = \lambda_g \ln \frac{L}{L_0}, \quad (\text{IV.12})$$

где $\Delta p v$ — уменьшение расхода перманганата калия по пути фильтрации, мг/л;

L — расчетный путь фильтрации, м;

L_0 — идеальный путь фильтрации при $\Delta p v = 0$ по опыту в самом малом масштабе, м;

λ_g — постоянная скорость реакции разложения (мг/л) из опыта в самом малом масштабе, когда для двух путей фильтрации (0,3 и 0,6 м) определялись соответствующие $\Delta p v$.

Для пересчета условий опыта на новую температуру воды T ($^{\circ}\text{C}$), скорость фильтрации v (м/сут) и эффективный диаметр частиц песка d_e (мм) рекомендуются следующие функциональные зависимости:

при учете изменений температуры воды

$$\Delta p v (T + 10^{\circ}\text{C}) = 1,8 \Delta p v (T), \quad (\text{IV.13})$$

при учете изменений скорости фильтрации

$$\Delta p v_1 = \Delta p v \left(\frac{V}{V_1} \right)^{\frac{1}{2.5}}, \quad (\text{IV.14})$$

при учете изменений гранулометрического состава грунтов

$$\Delta p v_1 = \Delta p v \frac{\ln \omega_1}{\ln \omega}. \quad (\text{IV.15})$$

Здесь ω — удельная поверхность грунта, равная

$$\omega = \frac{6}{d_s}. \quad (\text{IV.16})$$

С использованием параметра разложения органических веществ λ_g , найденного опытами на фильтрационных колоннах, в дальнейшем применительно к конкретным условиям искусственного восполнения подземных вод производятся расчеты их возможного естественного самоочищения от органических загрязнений.

Наиболее перспективны для прогноза изменения при инфильтрации качества воды как сложной многокомпонентной системы с учетом сорбции и фильтрационной дисперсии пород, решения, основанные на уравнениях массопереноса. Применительно к решению гидрогеологических задач, связанных с прогнозом миграции загрязнений в водоносных породах, эти вопросы рассмотрены в работах Н. Н. Веригина (1962), В. М. Шестакова и В. М. Рощаля (1961 г., 1969 г.), Ф. М. Бочевера, А. Е. Орадовской (1972, 1976 г.) и других исследователей.

Для учета процесса сорбции (поглощения) при продвижении загрязнений В. М. Шестаковым (1961 г.) введено понятие об эффективной пористости породы n_3

$$n_3 = n + \frac{1}{\beta}, \quad (\text{IV.17})$$

где n — активная пористость породы;

β — коэффициент распределения вещества между жидкой и твердой фазами.

При линейной изотерме Генри

$$\beta = \frac{C_p}{N}, \quad (\text{IV.18})$$

где C_p — равновесная концентрация рассматриваемого вещества в воде;

N — сорбционная емкость пород, представляющая собой предельное количество сорбируемого в данных условиях компонента при определенной его концентрации, отнесенной к единице объема грунта.

В свою очередь

$$N = \gamma_n N_n, \quad (\text{IV.19})$$

где γ_n — объемная масса породы;

N_n — количество загрязняющего сорбированного вещества, отнесенное к единице массы.

Тогда время T , в течение которого будет исчерпана сорбционная емкость пород между инфильтрационным бассейном и водозабором, приближенно составит

$$T = \frac{L}{v_\phi} \left(n + \frac{\gamma_n N_n}{C_p} \right), \quad (\text{IV.20})$$

где v_ϕ — средняя скорость фильтрации, м/сут;

L — общая длина пути фильтрации от бассейна до водозабора с учетом вертикального и горизонтального участков фильтрации, м.

Сорбционная емкость пород на вертикальном отрезке фильтрации при наличии закольматированного слоя и илистого осадка обычно соизмерима с сорбционной емкостью водовмещающих пород в их естественном состоянии. Поэтому, чтобы учесть удлинение пути фильтрации за счет дополнительного фильтрационного сопротивления верхних закольматированных слоев для приближенных расчетов по формуле (IV.20) следует полагать $L = L_0 + \Delta L$, где L_0 — удлинение фактического пути фильтрации за счет наличия в бассейне слабопроницаемого заиленного слоя.

Для прогноза изменения качества воды при фильтрации в плоско-параллельном потоке от линейного контура искусственного восполнения (канал, ряд бассейнов или поглощающих скважин) относительная концентрация вещества в любой точке с координатой $x(t)$ составит (Бочеввер, Орадовская, 1972)

$$\bar{C}(x, t) \approx 0,5 \operatorname{erfc} \left(\frac{x - v \cdot t}{2 \sqrt{D \cdot t}} \right), \quad (\text{IV.21})$$

где

$$\bar{C} = \frac{C - C_e}{C_n - C_e}, \quad (\text{IV.22})$$

C — прогнозная концентрация компонента в подземных водах при искусственном их восполнении;

C_e — концентрация компонента в естественных подземных водах;

C_n — концентрация компонента в воде системы искусственного восполнения;

erfc — значения функции, определяемые по специальным таблицам;

x — расстояние от контура восполнения до расчетной точки с учетом вертикального и горизонтального пути фильтрации, м;

$v = (V \cdot \beta) / n (1 + \beta)$ — скорость продвижения фронта загрязнения с учетом сорбции, м/сут;

V — скорость фильтрации, м/сут;

n — активная пористость породы;

$D' = (D \cdot \beta) / n (1 + \beta)$ — коэффициент дисперсии с учетом сорбции, м²/сут;

D — коэффициент конвективной (фильтрационной) дисперсии, м²/сут.

Коэффициент дисперсии связан со скоростью фильтрации зависимостью

$$D = \lambda v, \quad (\text{IV.23})$$

где λ — параметр геометрической структуры порового или трещинного пространства, м.

При кратковременном загрязнении подаваемой на инфильтрацию воды расчет концентрации отдельного вредного компонента в водозаборе, с учетом процессов дисперсии, сорбции и десорбции может производиться по формуле (Гольдин, 1976 г.)

$$C_v \approx 0,5 C_0 \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{x - V \cdot t}{2 \sqrt{D' \cdot t}} \right] - \operatorname{erfc} \left[\frac{x - V \cdot (t - t_n)}{2 \sqrt{k D' \cdot (t - t_n)}} \right] \right\}, \quad (\text{IV.24})$$

где t_n — продолжительность поступления микрозагрязнения на инфильтрацию, сут;

$K = D_2 / D_1$ — коэффициент, учитывающий влияние тупиковых пор на процесс десорбции;

D_1 — величина коэффициента дисперсии при сорбции (подача загрязнения на фильтрацию), м²/сут;

D_2 — величина коэффициента дисперсии при десорбции (промывка), м²/сут.

С целью повышения гигиенической надежности водозаборов подземных вод с искусственным их восполнением защитное действие пород водоносного горизонта должно учитываться только на случай непредвиденного кратковременного поступления загрязнений с инфильтруемой водой в количествах, превышающих предельно-допустимые концентрации.

Миграционные параметры водоносных пород: активная пористость n , коэффициент дисперсии D и параметр геометрической структуры λ определяются на фильтрационных колоннах или в полевых условиях по данным кустовых откачек или нагнетаний с использованием несорбируемых индикаторов. Лабораторные определения параметров поглощения пород (коэффициента распределения β и сорбционной емкости N) могут производиться двумя методами (Орадовская, Бочеве, 1969): а) в динамических условиях при инфильтрации загрязненной воды через грунт, заполняющий фильтрационную колонну, и б) по схеме опыта «в монолите» для приближенной оценки коэффициента распределения β . Параметры поглощения определяются в отдельности для

каждого загрязняющего компонента, обнаруженного в источнике искусственного восполнения, при данной его концентрации.

Поскольку при искусственном восполнении запасов подземных вод к качеству воды источника восполнения предъявляются вполне определенные требования, лимитирующие содержание отдельных загрязняющих и вредных компонентов, прогноз изменения качества воды с учетом сорбционных процессов на стадии гидрогеологического обоснования искусственного восполнения запасов подземных вод может не потребоваться.

Экспериментальное изучение сорбционных параметров пород следует проводить лишь в том случае, если возникает необходимость использовать для восполнения водоисточник с повышенной концентрацией вредных компонентов в отдельные периоды в связи с невозможностью предварительного улучшения качества воды, или же при обосновании специального использования в качестве самостоятельных сооружений для очистки вод.

**МЕТОДИКА РАЗВЕДОЧНЫХ
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ В СВЯЗИ
С ИСКУССТВЕННЫМ ВОСПРОИЗВОДСТВОМ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ
ВОД НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ВОДОЗАБОРАХ
И НОВЫХ ОБЪЕКТАХ**

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основные виды и методику проведения разведочных гидрогеологических работ целесообразно рассмотреть отдельно, применительно к принятой выше типизации гидрогеологических условий формирования искусственных ресурсов и запасов пресных подземных вод.

Для всех выделенных типовых условий имеется общий принцип выбора основных направлений и проведения разведочных гидрогеологических работ. Вместе с этим для каждого из выделенных типовых условий имеются и свои специфические особенности, на которые и необходимо обратить внимание в процессе изучения объекта.

Общим для всех типовых условий является принцип последовательных приближений, позволяющий поэтапно, научно обоснованно вести изучение конкретной проблемы искусственного воспроизводства ресурсов и запасов подземных вод для данных условий.

Этот принцип, как известно, является обязательным во всех случаях разведки месторождений полезных ископаемых. Требования эти целиком относятся и к разведочным гидрогеологическим работам, которые приводятся в связи с обоснованием искусственного воспроизводства и magazинирования подземных вод.

Как отмечалось выше, с точки зрения современных требований по дальнейшему повышению эффективности разведки, охраны и защиты окружающей среды гидрогеологические исследования для обоснования искусственного восполнения ресурсов и запасов подземных вод по своей направленности и содержанию должны входить составной частью общего комплекса разведки месторождений подземных вод. Поэтому на эти исследования целиком и распространяется главный принцип разведки — принцип стадийности.

По существу на всех стадиях изучения естественных месторождений подземных вод целесообразно включать в общий проект

разведки специальный раздел исследований, предусматривающий оценку и обоснования искусственного восполнения эксплуатационных запасов подземных вод. При этих условиях можно повысить эффективность гидрогеологических работ и создать определенный резерв разведанных запасов подземных вод, потребность в которых в нашей стране постоянно увеличивается.

Специфические особенности проведения гидрогеологических работ для выделенных типовых условий состоят в различных требованиях технологической схемы и методах оценки эксплуатационных запасов и, вообще, проекта искусственно создаваемых подземных вод на тех или иных объектах. Эти различия будут рассмотрены в соответствующих разделах данной главы.

Выше отмечалось, что в практике разведочные гидрогеологические работы с целью обоснования искусственного восполнения запасов подземных вод могут идти по двум основным направлениям:

- 1) на участках действующих водозаборных сооружений по эксплуатации подземных вод;
- 2) на новых разведываемых участках будущего размещения водозаборов и магазинирования поверхностных вод.

Эти два основных направления и определяют стадийность и содержание разведочных гидрогеологических работ.

Непосредственно на действующих водозаборных сооружениях гидрогеологические специальные исследования для воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод должны входить непосредственно в комплекс работ стадии эксплуатационной разведки. В этом случае обоснование постановки специальных исследований определяется

- а) заявленной дополнительной потребностью в воде;
- б) наметившейся тенденцией истощения запасов продуктивного горизонта;
- в) требованиями охраны окружающей среды;
- г) необходимостью реконструкции каптажного сооружения.

Что касается выбора основных направлений и содержания гидрогеологических исследований для искусственного воспроизводства запасов подземных вод, то эти вопросы определяются следующими основными факторами:

- 1) наличием вблизи действующего водозабора качественного источника искусственного питания продуктивного водоносного горизонта;
- 2) наличием на участке водозаборного сооружения необходимой территории для размещения инженерных сооружений для искусственного воспроизводства (в первую очередь инфильтрационных сооружений и др.);
- 3) литологическим составом пород, слагающих зону аэрации, их мощностью и фильтрационными свойствами;
- 4) гидрогеологическими и санитарно-биологическими условиями участка водозаборного сооружения;

5) экономическими расчетами, определяющими рентабельность искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод.

Таким образом, в данном случае действующий водозабор и наличие перечисленных факторов определяют объект и предмет гидрогеологических исследований.

Комплекс разведочных гидрогеологических работ по искусственному воспроизводству запасов подземных вод на участках действующих водозаборных сооружений, входящих в состав эксплуатационной разведки объекта, целесообразно выполнить в два этапа.

На первом этапе необходимо обобщить гидрогеологические и технические материалы по опыту эксплуатации подземных вод и каптажных сооружений. Одновременно с обобщением материалов по опыту эксплуатации целесообразно провести рекогносцировочное обследование района водозабора с целью предварительной оценки возможных источников искусственного питания подземных вод и выбора площадки для размещения будущих инженерных сооружений.

Результаты первого этапа исследований должны быть положены в основу выбора принципиальной схемы искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод, применительно для данного конкретного объекта, а также проектирования различных видов специальных исследований, необходимых для обоснования выбранной технологической схемы.

Второй этап исследований является завершающим. В этот период на объекте должен быть выполнен необходимый объем различных видов гидрологических, гидрогеологических, санитарно-биологических исследований, предусмотренных в проекте.

Что касается исследований на новых площадях, то разведочные гидрогеологические работы для обоснования эксплуатационных запасов с учетом их искусственного восполнения целесообразно выполнять постадийно. Напомним, что в нашей стране в этой части принято пять стадий изучения месторождения подземных вод: оценочные работы, поиски, предварительная, детальная и эксплуатационная разведки.

Рассмотрим содержание разведочных гидрогеологических исследований в соответствии с двумя отмеченными выше основными направлениями работ.

РАЗВЕДОЧНЫЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАБОТЫ НА УЧАСТКАХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВОДОЗАБОРОВ

Подчеркнем еще раз, что весь комплекс гидрогеологических исследований, проведенных с целью обоснования искусственных запасов подземных вод на действующих водозаборных сооружениях, должен входить в стадию эксплуатационной разведки.

В эту стадию можно наметить следующие основные виды работ и их содержание. Объемы по каждому виду исследований целесообразно определять в каждом конкретном случае, в зависимости от степени сложности гидрогеологических условий изучаемого объекта и накопленного опыта эксплуатации.

Обобщения и анализ гидрогеологических материалов по опыту эксплуатации подземных вод

Обобщение и анализ гидрогеологических материалов по опыту эксплуатации подземных вод на действующем водозаборе является очень важным исходным направлением общего комплекса исследований по проблеме искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод.

По существующим положениям в нашей стране стационарное изучение режима подземных вод при их эксплуатации должно быть организовано на каждом крупном водозаборном сооружении. Обобщение материалов стационарного изучения режима необходимо прежде всего для того, чтобы правильно оценить гидрогеологические условия, сложившиеся при длительной эксплуатации подземных вод. В этом отношении целесообразно составить или уточнить ранее составленную карту гидроизогипс, характеризующую динамику и структуру фильтрационного потока, площадь распространения депрессионной воронки, граничные условия потока в плане и разрезе, сложившиеся условия взаимосвязи подземных и поверхностных вод. Все эти гидрогеологические данные необходимы для непосредственного использования при проектировании инженерных сооружений.

Очень важным разделом обобщения материалов является уточнение фильтрационных параметров водоносных пород по данным режима эксплуатации. Результаты гидродинамических расчетов, выполненных с этой целью, могут быть использованы в дальнейшем для оценки эксплуатационных запасов подземных вод в условиях их искусственного воспроизводства.

Учитывая, что в настоящее время по существу не разработана методика прогноза качества подземных вод при длительной их эксплуатации, анализ собранных материалов на водозаборе по режиму химического состава является очень важным и существенным. В связи с этим можно рекомендовать составление различных графиков, характеризующих изменение или стабильность содержания в подземных водах основных химических компонентов, в том числе режим содержания вредных элементов.

При сложных условиях может возникнуть необходимость в составлении, по данным режимных наблюдений, гидрогеохимической карты участка водозаборного сооружения.

Данные по гидрогеохимическому режиму водозаборного участка будут необходимы для изучения физико-химической совме-

стимости пластовых и поверхностных вод, подготовленных для искусственного питания.

При значительной площади развития депрессионной воронки, сложных граничных и гидрогеологических условиях формирования фильтрационного потока материалы режима эксплуатационных подземных вод целесообразно обработать с помощью математического метода моделирования на АВМ. Преимущество этого метода состоит в том, что он позволяет произвести многовариантные решения поставленных задач и выбрать из них наиболее оптимальные.

В специальной главе рассмотрен пример обобщения и анализа гидрогеологических материалов по опыту эксплуатации одного водозаборного сооружения методом математического моделирования на АВМ.

Наряду с этим необходимо провести на действующем водозаборе обследование: технического состояния каптажных сооружений; технического состояния и конструкции эксплуатационных скважин, насосного оборудования и др. Эти данные необходимы для оценки технической возможности увеличения производительности водозабора с учетом его искусственного питания. Производительность водозабора можно увеличить путем монтажа новых насосов или путем ввода в действие новых скважин.

В тех случаях, когда на участке действующих водозаборов наблюдательная сеть для изучения режима подземных вод отсутствует или является недостаточной для всестороннего анализа гидрогеологических условий участка, необходимо предусмотреть в процессе эксплуатационной разведки специальное бурение наблюдательных скважин и организацию режимных наблюдений.

Рекогносцировочное обследование района расположения действующего водозабора позволяет в предварительном виде оценить возможные для данных условий источники искусственного питания подземных вод, а также выявить площади для размещения будущих инженерных сооружений.

Таким образом, в результате обобщения и анализа материалов режима эксплуатации водозабора должны быть изучены и освещены следующие вопросы:

- 1) характеристика режима фильтрации потока подземных вод, сформировавшегося при длительной эксплуатации;
- 2) тенденция истощения эксплуатационных запасов подземных вод или ухудшения их качества;
- 3) площадь формирования депрессионной воронки сниженных уровней подземных вод;
- 4) техническое состояние и возможности увеличения производительности действующего водозабора;
- 5) наличие возможных источников искусственного питания подземных вод;

б) возможности размещения на водозаборном участке специальных инженерных сооружений для искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод.

Как видно из изложенного, опыт обобщения и анализа режима многолетней эксплуатации действующего водозабора по существу своего содержания является исходным материалом для проектирования последующих разведочных гидрогеологических работ и предварительных проектных проработок общей задачи.

Изучение и оценка природных факторов определения условий воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод

К основным природным факторам, определяющим условия воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод на участке действующих водозаборов, следует отнести:

- 1) гидрогеологические условия изучаемого объекта;
- 2) источник искусственного питания (его качество и количество);
- 3) геоморфологические условия территории, примыкающей к водозабору (условия размещения поверхностных инфильтрационных сооружений);
- 4) геолого-литологические условия и в первую очередь строение, условия залегания, мощность и литологический состав пород зоны аэрации.

Для изучения перечисленных выше основных природных факторов целесообразно на участке действующего водозабора провести следующие виды работ.

Детальная комплексная геолого-гидрогеологическая съемка участка действующего водозабора

Детальную комплексную съемку следует проводить на площади, примыкающей к действующему водозабору, для получения необходимой исходной информации и обоснования возможного размещения и проектирования поверхностных или подземных инженерных сооружений с целью искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод.

На рис. 35 представлена схематическая литолого-гидрогеологическая карта масштаба 1 : 5000 участка речной долины, тяготеющего к расположению действующего водозабора. Информация такой карты позволяет четко выявить площадь, имеющую наиболее благоприятные условия для проектирования открытых поверхностных сооружений. Эта площадь может быть оконтурена по правому берегу речной долины, где первая надпойменная терраса имеет сравнительно большое распространение. С поверхности первая надпойменная терраса, как было установлено исследованиями, сложена покровными суглинками мощностью от 1

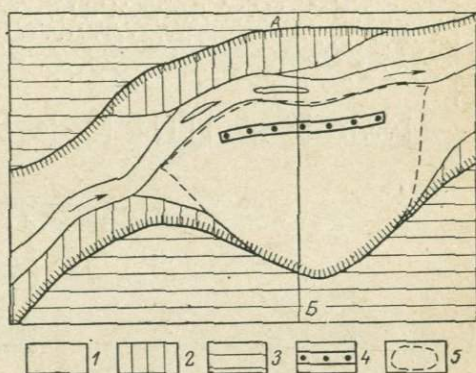
до 2 м, залегающими непосредственно на водоносных породах продуктивного горизонта — песчано-галечниковых отложениях (рис. 36).

В процессе съемки и стационарных режимных наблюдений было установлено, что депрессионная воронка сниженных уровней распространена на площади около 0,5 км², а поток грунтовых вод имеет стационарный режим фильтрации. Грунтовые воды аллювиальных отложений на участке имеют хорошую гидравлическую связь с поверхностными водами реки.

Таким образом, по результатам детального комплексного картирования по правому берегу долины удалось выявить перспективный участок для размещения инженерных сооружений,

Рис. 35. Схематическая литолого-гидрогеологическая карта участка водозабора.

1 — песчано-гравийные отложения первой надпойменной террасы (покровные суглинки мощностью 1 — 2 м); 2 — лессовидные породы высоких террас; 3 — лессы высоких террас; 4 — действующий водозабор; 5 — площадь развития депрессионной воронки, перспективная для размещения инженерных сооружений искусственного питания подземных вод



на котором целесообразно в дальнейшем провести специально опытно-фильтрационные исследования.

Детальное комплексное геолого-гидрогеологическое картирование целесообразно проводить в масштабах от 1 : 2000 до 1 : 5000, реже 1 : 25 000. Выбор масштаба детальной съемки должен производиться в каждом конкретном примере, в зависимости от площади размещения действующего водозабора, требований проектных организаций, а также условия формирования депрессионной воронки.

Учитывая указанные масштабы, необходимую информацию, а также использование в последующем карты непосредственно для проектирования инженерных сооружений, детальную съемку на водозаборном участке целесообразно проводить на инструментальной основе.

Выше отмечалось, что на каждом действующем водозаборном сооружении должна быть собрана гидрогеологическая информация, накопленная в процессе эксплуатации подземных вод, а также по результатам предыдущей разведки. Эта информация должна явиться базой для постановки и проведения детального комплексного картирования: выбора масштаба, площади картирования и содержания комплексной съемки.

В процессе детального картирования необходимо выполнить определенный объем поисково-разведочного бурения и горных работ легкого типа (шурф).

Бурение поисково-разведочных скважин целесообразно проектировать по поперечникам, а также вдоль возможного разме-

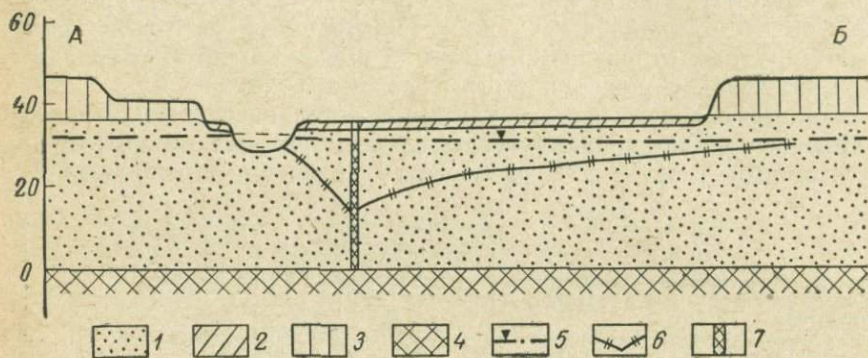


Рис. 36. Схематический разрез по линии А — Б.

1 — водоносные аллювиальные пески; 2 — покровные суглинки надпойменной террасы; 3 — лессовидные породы высоких террас; 4 — водонепроницаемые породы; 5 — уровень грунтовых вод до эксплуатации; 6 — депрессионная воронка; 7 — фильтры скважин

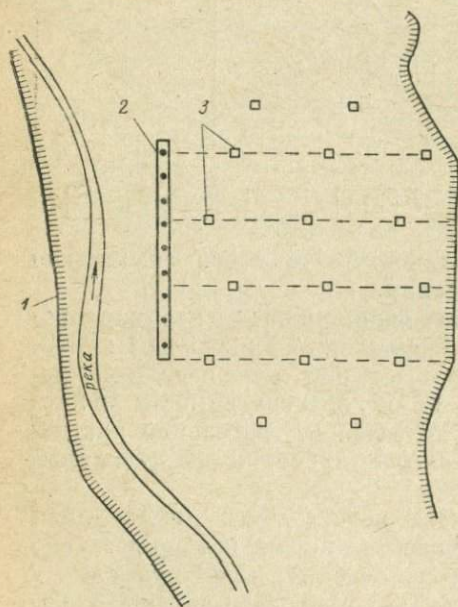


Рис. 37. Схема размещения разведочных шурфов с целью изучения фильтрационных свойств пород зоны аэрации.

1 — контур речной долины; 2 — водозаборное сооружение; 3 — разведочные шурфы, расположенные по профилям

щения инфильтрационных сооружений (рис. 37). Буровыми работами необходимо изучить литологическое строение пород зоны аэрации.

Детальное изучение фильтрационных свойств горных пород зоны аэрации

Искусственное питание подземных вод на участке водозаборного сооружения чаще всего производится с помощью инженер-

ных сооружений путем инфильтрации поверхностных вод через породы зоны аэрации. Поэтому изучение водопроницаемых свойств горных пород этой зоны имеет первостепенное значение при решении рассматриваемой проблемы. Гидрогеологические параметры горных пород служат основой аналитических расчетов

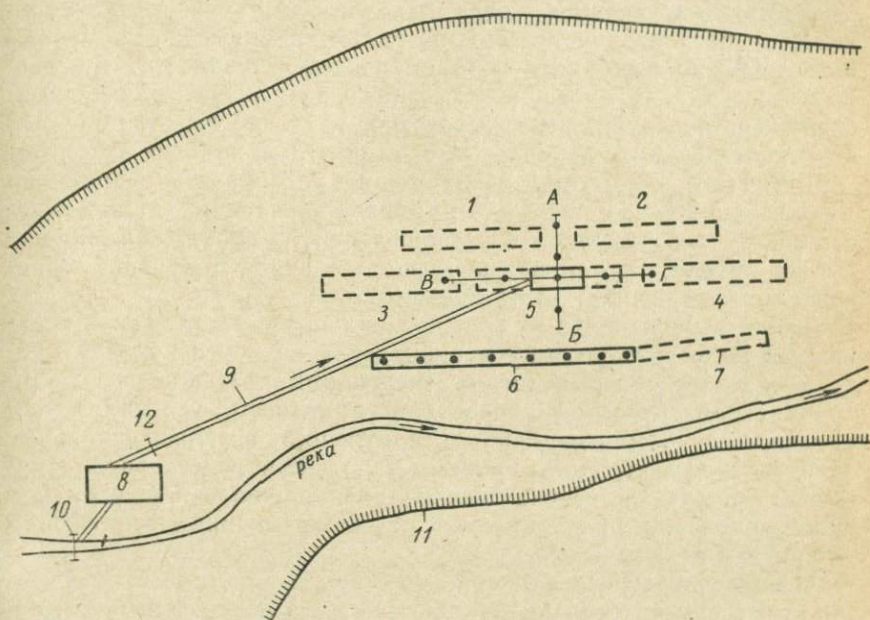


Рис. 38. Схема размещения опытного полигона на водозаборном участке.

1, 2, 3, 4 — проектируемые инфильтрационные бассейны; 5 — опытный инфильтрационный бассейн (в контуре проектируемого); 6 — действующее водозаборное сооружение; 7 — проектируемое расширение водозабора; 8 — временный (опытный) отстойник; 9 — водовод; 10 — опытная насосная станция; 11 — контур распространения речной долины; 12 — регистрирующее устройство для подачи воды в опытный бассейн; А — Б и В — Г — профили размещения наблюдательных скважин

для оценки величины искусственного питания, а также для проектирования инженерных сооружений.

О литологическом составе пород, слагающих зону аэрации, и степени их неоднородности в горизонтальном и вертикальном направлениях можно судить по результатам детального комплексного картирования водозаборного участка и перспективной площади возможного размещения инженерных сооружений.

Кроме того, следует учитывать, что на водозаборном участке на площади развития депрессионной воронки, сформировавшейся под влиянием длительной эксплуатации водозабора, мощность зоны аэрации обычно больше естественной.

Анализ материалов детального комплексного картирования и карт гидроизогипс, естественный и нарушенный режим фильтрации потока могут позволить в предварительном виде охарактер-

ризовать структуру потока и возможную фильтрационную неоднородность пород зоны аэрации.

Результаты такого анализа должны послужить основанием для выбора направлений и объемов опытно-фильтрационных работ.

В сложных условиях, когда на изучаемой площади отмечается высокая неоднородность, опытно-фильтрационные исследования целесообразно выполнять в такой последовательности. Вначале на перспективной площади возможного размещения инженерных сооружений следует провести точечное изучение фильтрационных свойств пород зоны аэрации методом опытных наливов в шурфы.

Шурфы для опытных работ можно располагать равномерно на площади в виде поперечных профилей перпендикулярно к водозаборному сооружению. Расстояние между профилями определяется литологической неоднородностью пород покровных образований и строением зоны аэрации (рис. 38).

Такие первоначальные исследования позволят получить сравнительную характеристику и оконтурить на перспективной площади участки с повышенными значениями коэффициента фильтрации, т. е. участки с более благоприятными условиями для размещения инфильтрационных сооружений, а также начальные скорости инфильтрации. Глубину заложения разведочных шурфов для производства опытных наливов можно ограничить глубиной заложения проектируемых инфильтрационных сооружений (в среднем от 1 до 3 м).

Сущность опытных наливов заключается в том, чтобы изучить фильтрационные свойства той части разреза пород зоны аэрации, которая выбрана для фильтрующей поверхности инженерных сооружений. Этим и определяется глубина заложения шурфов.

Учитывая важность опытно-фильтрационных работ для оценки искусственного питания подземных вод, методику их проведения излагаем в специальной главе настоящей монографии.

Гидрологические исследования

Специальные гидрологические исследования на объекте проводятся с целью изучения и оценки возможного источника искусственного воспроизводства запасов подземных вод на участке действующего водозабора. Наличие надежного источника питания, удовлетворяющего требованиям по количеству и качеству, является основным условием искусственного восполнения запасов подземных вод.

Направление, перечень и объемы гидрологических исследований определяются режимом формирования источника питания. В этом отношении источники питания можно подразделить на три основные группы:

а) постоянно действующие поверхностные воды крупных или мелких рек, озер, водохранилищ, ирригационно-обводнительных каналов;

б) временно или периодически действующие поверхностные воды мелких рек, озер, ирригационных каналов;

в) разовый весенний, ливневый сток местной речной сети.

Как видно из приведенного подразделения, наиболее надежными для искусственного воспроизводства запасов подземных вод являются поверхностные воды первой группы, не требующие при использовании строительства никаких инженерных сооружений для их предварительной аккумуляции.

Наилучшим вариантом из первой группы источников питания являются поверхностные воды озер и водохранилищ, которые по требованию рассматриваемой проблемы по существу уже предварительно могут быть подготовлены для использования.

Воды в крупных естественных и искусственных резервуарах очищены от твердого стока и взвешенных частиц, что является весьма благоприятным для искусственного питания.

Для оценки источников питания первой группы можно, таким образом, ограничиться гидрологическими исследованиями по сокращенной программе, изучив главным образом качество поверхностных вод. Условия формирования режима водоемов обычно являются хорошо изученными организациями Гидрометслужбы.

Гидрологические исследования в указанном направлении на реках, озерах и водохранилищах с постоянным режимом поверхностных вод рекомендуется проводить по общепринятой методике, разработанной Главным Управлением гидрометслужбы при Совете Министров СССР.

При использовании поверхностных вод второй группы требуется изучить не только их качество, но и достаточно тщательно их количество и в первую очередь режим формирования и периодичность действия потоков. В некоторых случаях может быть потребовано проведение специальных дополнительных полевых исследований для обоснования строительства инженерных сооружений с целью возможной аккумуляции поверхностного стока в водохранилищах годичного регулирования и обеспечения круглогодичной подачи сырой воды в инфильтрационные сооружения.

Малонадежными по степени обеспеченности являются поверхностные воды разового весеннего стока местной гидрографической сети, условия формирования которого определяются многолетней цикличностью и обычно очень слабо изучены.

Первым неперенным видом работ специальных гидрологических исследований для всех ранее выделенных групп является сбор, обобщение и анализ материалов местных управлений Гидрометслужбы и других ведомств. При отсутствии режимных наблюдений непосредственно по площади изучаемого объекта могут быть использованы материалы по площади бассейнов-аналогов, а также имеющийся опыт практического использования поверхностных вод для искусственного воспроизводства запасов

подземных вод, накопленные в аналогичных гидрометеорологических условиях. Количественная оценка поверхностных вод при этом может быть выполнена камеральным путем.

В тех случаях, когда не представляется возможность оценить источник искусственного питания даже по аналогии, особенно для малых речных бассейнов, возникает необходимость проведения на объекте полевых гидрологических и балансово-гидрометрических исследований с целью изучения прежде всего количественной характеристики поверхностного стока, его режима и условий формирования.

Методика проведения полевых балансово-гидрометрических исследований малых рек достаточно подробно освещена в изданных трудах Государственного Гидрологического института, поэтому в настоящем разделе не рассматривается.

Необходимо отметить, что надежность выбранного источника искусственного питания речных вод при постоянном его использовании целесообразно оценивать по величине минимальных расходов реки 95%-ной обеспеченности гидрологического года, если не планируется регулирование стока в водохранилищах.

В комплексе гидрогеологических исследований входит также изучение качества выбранного источника искусственного питания подземных вод. При этом можно пользоваться действующими в настоящее время «Рекомендациями по проектированию сооружений для искусственного пополнения подземных вод с целью хозяйственно-питьевого водоснабжения», подготовленными Академией коммунального хозяйства РСФСР при участии ВСЕГИН-ГЕО и Института общей и коммунальной гигиены им. А. Н. Сысина Академии медицинских наук СССР.

При подготовке воды для искусственного восполнения подземных вод способом нагнетания в скважины к содержанию в закачиваемых водах взвешенных частиц, планктона, растворенных газов и органических веществ, к бактериальному загрязнению, цветности должны предъявляться более высокие требования, чем при инфильтрации с помощью бассейнов. Для предварительных оценок можно принять, что мутность воды не должна превышать 2 мг/л, а содержание суммарного железа должно составлять не более 0,5 мг/л. По другим показателям, как, например, сухой остаток, содержание хлоридов, сульфатов, фтора, общей жесткости, солей тяжелых металлов и других вредных веществ, требования к качеству воды как при свободной, так и при напорной инфильтрации допустимо принять одинаковыми. В отличие от восполнения с помощью инфильтрационных бассейнов вода, закачиваемая в скважины, должна проходить предварительное обеззараживание, чтобы не допустить бактериального загрязнения подземных вод.

При искусственном воспроизводстве эксплуатационных запасов подземных вод на действующих водозаборах, предназначенных для технического водоснабжения, требования к качеству

источника питания не разработаны. Они могут быть несколько снижены и должны определяться в каждом конкретном случае геолого-гидрохимическими условиями водозаборного участка, технологической схемой производства и условиями гидрохимической совместимости поверхностных и пластовых вод. Последнее обстоятельство является весьма важным, особенно в том случае, если в качестве питания используются поверхностные воды повышенной минерализации.

Итак, при оценке качества выбранного источника искусственного питания по существу предъявляются требования к их химическому составу, физическим и санитарно-биологическим свойствам.

Эти свойства должны изучаться непосредственно в процессе проведения специальных гидрологических исследований.

В связи с этим при исследовании качества поверхностных и подземных вод необходимо выполнить сокращенные, полные, санитарно-бактериологические, специальные химические анализы и определение физических свойств воды. Особое внимание при этом должно уделяться изучению тех физико-химических показателей или загрязняющих компонентов, содержание которых ожидается по общей санитарно-гигиенической обстановке в районе источника искусственного восполнения.

Недостаточная изученность качества поверхностных вод, предназначенных для искусственной инфильтрации, создает опасность загрязнения подземных вод при опытно-фильтрационных работах и последующей эксплуатации систем искусственного восполнения.

Пробы воды на химический анализ и физические свойства отбираются в зависимости от характера водного и гидрохимического режима источника восполнения.

Санитарно-гигиеническая оценка источника восполнения (реки, водоемы) проводится путем обследования района возможного забора поверхностной воды и составления карты (схемы) района водозабора и участка реки (водоема) с отражением всех возможных источников загрязнения подземных и поверхностных вод.

Микробиологическое изучение поверхностных вод, предназначенных для искусственной инфильтрации, производится одновременно с изучением химического состава и органолептических свойств путем отбора и анализа проб воды на общепоказательные бактерии.

По результатам гидрохимических и микробиологических исследований составляются графики колебаний во времени основных физико-химических и санитарных показателей воды, анализ которых позволяет установить гидрохимический и санитарно-бактериологический режим источника пополнения, выделить периоды с повышенными против нормативных требований концентрациями отдельных ингредиентов и обосновать рекомендации по регулированию качества воды с учетом процессов смешения,

самоочищения при инфильтрации (по некоторым показателям), периодического отключения подачи воды или применения методов предварительной подготовки.

Особое место при оценке качества источника искусственного восполнения занимают методы предварительной подготовки исходной воды.

Хотя эти вопросы непосредственно относятся к проектированию технологических схем искусственного питания, тем не менее гидрогеологу-разведчику целесообразно иметь об этих методах общее представление и при возможности учитывать их в процессе проведения опытно-разведочных и опытно-фильтрационных работ.

Наибольшее распространение в современной практике водоснабжения получили простейшие виды очистки поверхностных вод: естественное отстаивание, фильтрование, аэрация, а при наличии планктона — микрофильтрация. В случае необходимости следует производить предварительное обеззараживание воды, особенно нагнетаемой в скважины, хлорированием или другим методом для подавления жизнедеятельности микроорганизмов и предупреждения развития планктона.

При наличии сильно загрязненных водоемчиков, особенно промстоками, применяются более сложные методы очистки поверхностной воды, включающие двухступенную водоподготовку (отстаивание, фильтрация с коагуляцией, известкованием, углеванием, иногда в сочетании с микрофильтрацией, аэрацией и хлорированием). В этом случае в состав основных сооружений могут входить отстойные бассейны или осветлители, специальные окислительные бассейны, скорые фильтры, устройства для коагулирования, известкования или углевания, аэрации и хлорирования; иногда в сочетании с микрофильтрами.

Как видно из краткого содержания требований к качеству и количеству выбранного источника питания, для проведения гидрогеологических исследований на изучаемом объекте целесообразно привлекать соответствующего профиля специалистов. Необходимо также пользоваться с этой целью услугами специализированных лабораторий, имеющих опыт в производстве анализов по изучению физических, химических и санитарно-бактериологических свойств поверхностных вод.

Одновременно с проведением специальных гидрологических исследований необходимо собрать сведения, характеризующие климатические условия района работ, и в первую очередь данные по температурному режиму воздуха, глубине сезонного (зимнего) промораживания пород зоны аэрации. Все эти факторы непосредственно оказывают свое влияние на режим искусственного питания, на выбор конструкции фильтров в открытых инфильтрационных сооружениях, на обоснование технологического процесса.

Как отмечалось ранее, наиболее благоприятными для искусственного питания подземных вод являются такие климатические условия, которые характеризуются существенно положительной

среднегодовой и положительной в среднем за зимний сезон температурой воздуха. В таких благоприятных климатических условиях можно практически проводить круглый год все строительные, ремонтные работы и не опасаться промерзания фильтра в открытых инфильтрационных сооружениях.

Вместе с тем следует иметь в виду, что от температурного режима, тесно связанного с климатом, поверхностных вод зависит и технология искусственного питания.

В условиях сурового сибирского климата с существенно низкой и нередко с отрицательной среднегодовой температурой воздуха, с глубиной сезонного промерзания пород зоны аэрации до 2,5—3 м проведение работ по искусственному питанию подземных вод на действующих водозаборах в определенной степени усложняется. Эти факторы оказывают непосредственное влияние на выбор способа, конструкции сооружений, на технологию и режим воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод.

В связи с изложенным по району изучаемого объекта должна быть представлена полная характеристика климатических условий, которую следует рассматривать как исходные данные для проектирования инженерных сооружений и технологической схемы искусственного питания подземных вод.

РАЗВЕДКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА НОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ С УЧЕТОМ ИСКУССТВЕННОГО ИХ ВОСПРОИЗВОДСТВА

На новых объектах, где отсутствуют водозаборные сооружения, в соответствии с содержанием общей проблемы искусственного восполнения эксплуатационных запасов необходимо решить три следующие задачи:

- 1) разведать и оценить эксплуатационные запасы подземных вод с использованием естественных ресурсов;
- 2) изыскать и изучить источник искусственного питания подземных вод;
- 3) обосновать и оценить общие эксплуатационные запасы с учетом искусственного их восполнения.

В соответствии с этими задачами в процессе разведки нового объекта необходимо по существу провести весь комплекс традиционных работ и, кроме того, выполнить дополнительные, специальные исследования.

Комплекс традиционных разведочных работ, их содержание и методика проведения для решения первой задачи достаточно подробно освещены в ряде опубликованных монографий (Н. И. Плотников, 1968, 1973 гг.; Л. С. Язвин, Б. Л. Боровский, 1976 г.; Ф. М. Бочеввер, 1976 г., и др.). В связи с этим в настоящем разделе эти вопросы не рассматриваются.

Необходимо, однако, подчеркнуть одно очень важное обстоятельство. При искусственном восполнении эксплуатационных запасов подземных вод в поисковую стадию следует обратить внимание на более тщательный выбор участка под разведку будущего водозаборного сооружения. При выборе участка необходимо учитывать размещение инфильтрационных сооружений в соответствии с требованиями возможной технологической схемы искусственного питания подземных вод.

Для решения второй и третьей задач, перечисленных выше, на новом объекте необходимо выполнить дополнительные гидрогеологические исследования, которые должны быть органически связаны с общим комплексом традиционных разведочных работ.

В соответствии с принципом последовательных приближений на новых объектах комплекс разведочных гидрогеологических работ должен быть выполнен в пять стадий: стадия прогнозной оценки, поисковая стадия, предварительная разведка, детальная стадия изучения объекта и эксплуатационная разведка.

Практика разведки, накопленная в нашей стране, показывает, что в зависимости от степени изученности района, степени сложности и намечаемого способа искусственной инфильтрации поверхностных вод для дополнительного питания продуктивного горизонта отдельные стадии поисково-разведочных работ могут быть объединены или сокращены во времени. В этом и состоит творческий подход к проведению поисково-разведочных работ при изучении месторождений подземных вод.

В сводной табл. 6 в обобщенном виде приведены некоторые общие соображения, характеризующие целевое назначение, состав поисково-разведочных работ, результаты стадийных исследований. Этими данными можно пользоваться в процессе проектирования поисково-разведочных работ на новых месторождениях подземных вод с искусственным восполнением их запасов.

Как видно из данных табл. 6, на всех стадиях изучения новых объектов помимо традиционных поисково-разведочных работ предусматриваются специальные исследования, результаты которых в совокупности со всем комплексом работ должны послужить надежным основанием для проектирования водозаборного сооружения с искусственным восполнением эксплуатационных запасов подземных вод.

К специальным исследованиям следует отнести:

1) гидрологические исследования с целью изучения количественной и качественной характеристики выбранного источника искусственного питания подземных вод;

2) санитарно-бактериологические исследования с целью получения исходных данных для разработки рекомендаций по подготовке исходной воды для инфильтрации, технологической схемы и организации зон санитарной охраны;

3) буровые и опытные работы непосредственно на участке размещения инфильтрационных сооружений для искусственного

питания с целью изучения литологического строения зоны аэрации;

4) опытно-фильтрационные исследования с целью изучения фильтрационных свойств горных пород зоны аэрации на участке искусственного питания и исходных параметров, необходимых для расчетов инфильтрационных сооружений.

Состав перечисленных специальных исследований и методика их проведения рассмотрены в соответствующих разделах монографии.

В части стадийности изучения новых объектов необходимо отметить следующее. Из всех стадий наиболее важной и наиболее ответственной по своему содержанию является стадия предварительной разведки. Именно в эту стадию изучения нового объекта необходимо:

а) представить принципиальную оценку эксплуатационной возможности разведываемого участка с учетом искусственного восполнения запасов подземных вод и заявленной потребностью в воде и оценить запасы по категориям B_1 , C_1 и C_2 ;

б) определить общие масштабы месторождения и перспективы его дальнейшего расширения путем искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов подземных вод;

в) представить в предварительном виде качественную и количественную характеристику источника искусственного питания;

г) разработать рекомендации по общей схеме водозабора и технологические схемы искусственного восполнения запасов.

Во всех перечисленных основных положениях должны быть изложены исходные материалы по результатам предварительной разведки с целью обоснования первой стадии разработки проекта водозаборного сооружения.

При этом необходимо иметь в виду, что для первой стадии проектирования водозаборных сооружений с системой искусственного восполнения запасов подземных вод по результатам предварительной разведки должны быть освещены следующие вопросы:

1) основные положения, характеризующие геологическое строение и гидрогеологические условия участка разведки, в том числе граничные условия потока подземных вод в плане и разрезе;

2) характеристика пород, слагающих зону аэрации, и их фильтрационные свойства (в предварительном виде);

3) предварительная количественная и качественная характеристика выбранного источника искусственного восполнения (при необходимости должны быть изложены соображения по предварительной водоподготовке);

4) оценка санитарно-гигиенической обстановки участка будущего водозабора в намечаемой системе искусственного восполнения запасов подземных вод, а также соображения по организации зон санитарной охраны;

Целевое назначение и состав работ по основным стадиям разведочных гидрогеологических работ при изучении месторождений подземных вод с искусственным восполнением их запасов

Стадия работ	Целевое назначение	Основное содержание работ	Результаты исследований
Прогнозная	Выявление общих возможностей удовлетворения заявленной потребности в воде с учетом искусственного восполнения запасов подземных вод. Обоснование постановки дальнейших гидрогеологических работ поисковой стадии	Весь комплекс работ выполняется камеральным путем. Сбор, систематизация, анализ и обобщение имеющихся материалов по опыту разведки и эксплуатации подземных вод, геолого-гидрогеологическим, гидрологическим и санитарным условиям изучаемого района. Изучение аналогов по искусственному восполнению подземных вод в однозначных природных условиях	Оценка перспектив в региональном плане, возможностей и условий применения искусственного восполнения запасов подземных вод в различных районах с выделением первоочередных площадей для проведения поисковых работ
Поисковая	Обоснование постановки разведочных гидрогеологических работ (стадия предварительной разведки) и составления ТЭДа (по крупным объектам)	Комплекс полевых работ: среднemasштабная гидрогеологическая съемка перспективной площади и наземные геофизические исследования (ВЭЗ, электропрофилирование), бурение и откачки из отдельных поисковых скважин, опытно-фильтрационные работы. Санитарное обследование района, изучение режима подземных вод, специальные	Принципиальная оценка перспектив изучаемых участков (оценка возможностей искусственного пополнения запасов подземных вод). Оценка эксплуатационных запасов подземных вод (с учетом искусственного их восполнения) по категориям С ₁ и С ₂ . Обоснование направления дальнейших работ
		гидрологические работы. Гидрохимические исследования источника искусственного питания, изучение опыта эксплуатации подземных вод в районе исследований	
Предварительная разведка	Обоснование постановки детальной разведки подземных вод с искусственным их восполнением первой стадии проектирования всего комплекса водозаборных сооружений	Комплекс полевых работ: крупномасштабная гидрогеологическая съемка на выбранных участках и геофизические исследования. Бурение разведочных и наблюдательных скважин на участках заложения водозаборов и сооружений искусственной инфильтрации. Опытно-фильтрационные исследования в скважинах. Комплекс геофизических каротажных работ в скважинах. Проходка разведочных шурфов и опытных бассейнов, специальные опытно-фильтрационные работы; отбор и анализ проб грунтов пород зоны аэрации. Продолжение гидрологических исследований по изучению источника искусственного восполнения запасов, а также гидрохимических и санитарно-бактериологических исследований поверхностных и подземных вод. Изучение режима подземных и поверхностных вод. Качественное опробование вод	Принципиальная оценка масштаба объекта, производительности будущих водозаборных сооружений с учетом искусственного пополнения запасов подземных вод и оценка санитарно-гигиенических условий; рекомендации по общей схеме водозабора и технологической схеме искусственного восполнения запасов подземных вод. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод (с учетом искусственного их восполнения) по категориям В, С ₁ и С ₂

Стадия работ	Целевое назначение	Основное содержание работ	Результаты исследований
Детальная разведка	Обоснование второй стадии проектирования и строительства водозабора в комплексе с сооружениями искусственного восполнения подземных вод	Комплекс полевых работ: бурение разведочно-эксплуатационных скважин с откачками из них в соответствии с выбранной схемой водозабора; каротажные исследования в скважинах. Комплекс фильтрационных работ на объектах (бассейнах или узлах нагнетательных скважин); бурение сети наблюдательных скважин. Продолжение наблюдений за режимом подземных вод, гидрологических работ, гидрохимических и санитарно-бактериологических исследований подземных и поверхностных вод; детальное качественное опробование подземных и поверхностных вод	Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с учетом искусственного их восполнения по категориям А, В, С ₁ и С ₂ ; изложения всех исходных материалов для составления технорабочего проекта, всего комплекса водозаборных сооружений. Рекомендации по дальнейшему направлению исследований на водозаборном участке
Эксплуатационная разведка	Обоснование рационального режима эксплуатации, расширения действующего водозабора и увеличения его производительности с учетом искусственного восполнения подземных вод; охрана окружающей среды на площади влияния водозаборного сооружения	Доразведка водозабора на смежных участках с бурением разведочных и наблюдательных скважин, геофизическими исследованиями. Наблюдения за режимом эксплуатации водозабора и системы искусственной инфильтрации (изучение режима подземных и поверхностных вод); сравнительная оценка материалов и опыта эксплуатации	Разработка рекомендаций по рациональному режиму эксплуатации водозабора и системы искусственной инфильтрации; рекомендации по совершенствованию методики разведки по опыту эксплуатации

5) определение основных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их естественного и искусственного питания;

6) характеристика расчетных гидрогеологических параметров водоносного горизонта (водопроницаемость, уводнепроводность, водоотдача), условия взаимосвязи подземных вод с рекой (водоемом), предварительное обоснование скорости свободной инфильтрации при восполнении грунтовых вод с помощью инфильтрационных бассейнов;

7) разработка рекомендаций по схеме будущего водозабора и инфильтрационных сооружений, их возможное замещение по площади и режим намечаемой эксплуатации;

8) предварительное обоснование расчетной схемы и оценка общей производительности будущего водозабора с учетом искусственного восполнения запасов подземных вод и соображения о возможных изменениях качества подземных вод (оценка эксплуатационных запасов по категориям B_1 , C_1 и C_2);

9) технико-экономические расчеты по укрупненным показателям о необходимости постановки детальной разведки.

Наряду с этим из всех стадий изучения новых объектов наиболее сложной и трудоемкой является стадия детальной разведки. Именно в стадию детальной разведки необходимо провести трудоемкие длительные опытно-фильтрационные работы в инфильтрационных бассейнах, методика которых рассмотрена в главе VIII.

Учитывая трудоемкости этих работ, целесообразно стадию детальной разведки по времени по возможности совмещать со строительством водозаборных сооружений, включая строительство инфильтрационных сооружений и водоемов с целью подачи исходной воды для опытных работ. Такое совмещение позволит все сооружения, необходимые для длительных опытно-фильтрационных работ, в дальнейшем использовать непосредственно при эксплуатации водозабора.

Как отмечалось выше, по результатам дополнительной разведки составляется технорабочий проект водозабора с искусственным восполнением запасов. В связи с этим необходимо по материалам детальной разведки:

1) детально охарактеризовать геологическое строение и гидрогеологические условия участка водозабора и намечаемой системы искусственной инфильтрации и подтвердить выбор наиболее рационального в данных условиях метода искусственного восполнения запасов подземных вод;

2) уточнить граничные условия фильтрационного потока подземных вод участка водозабора и источники формирования запасов подземных вод при их естественном и искусственном питании;

3) детально осветить гидрологический и гидрохимический режим источника восполнения, его санитарное состояние, в том числе определить надежность источника восполнения в отношении количества воды для года 95%-ной обеспеченности; подтвердить

пригодность качества воды для целей искусственного восполнения подземных вод и разработать рекомендации по предварительной водоподготовке;

4) детально обосновать расчетные гидрогеологические параметры пород зоны аэрации и зоны полного водонасыщения, а также параметры заиленного слоя в бассейнах и фильтрационные сопротивления; дать количественную оценку взаимосвязи подземных и поверхностных вод; определить опытным путем или расчетами среднюю скорость инфильтрации в бассейнах и ее изменения в течение фильтрационного цикла;

5) оценить возможное влияние климатических условий на режим и технологию искусственного восполнения подземных вод;

6) оценить общую производительность водозабора с искусственным восполнением подземных вод применительно к выбранным схемам водозахватных сооружений, систем искусственной инфильтрации и режиму их эксплуатации (запасы оценены по категориям А, В, С₁ и С₂);

7) разработать рекомендации по схеме водозабора и системе искусственного восполнения подземных вод, а также режиму эксплуатации и восполнения;

8) дать прогноз возможных изменений качества подземных вод в процессе искусственного восполнения на расчетный срок эксплуатации водозабора и системы искусственной инфильтрации;

9) детально охарактеризовать санитарно-гигиенические условия участка водозабора, системы искусственного восполнения, источника пополнения (реки, водоема, канала) и определить зоны санитарной охраны применительно к конкретным гидрогеологическим и геоморфологическим условиям;

10) оценить возможные изменения гидрогеологических и санитарных условий района в целом и отдельных его участков в связи с длительной эксплуатацией и искусственным восполнением подземных вод.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ЦЕЛЮ ОБОСНОВАНИЯ МАГАЗИНИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Выше отмечалось, что в принятой типизации гидрогеологических условий искусственного формирования пресных подземных вод (см. табл. 1) четко выделяется направление, связанное с их магазинированием. Поэтому целесообразно рассмотреть отдельно методику разведочных гидрогеологических исследований применительно к обоснованию искусственного магазинирования поверхностных вод в естественных и искусственно созданных подземных емкостях.

Искусственное магазинирование поверхностных вод рассмотрено для двух наиболее часто встречаемых условий:

а) накопления поверхностного стока в довольно мощной хорошо водопроницаемой толще горных пород с целью направленного периодического накопления емкостных запасов и постоянного их отбора;

б) создания линз пресных подземных вод в породах зоны аэрации.

По эксплуатационным возможностям способ искусственного регулирования емкостных запасов, осуществление которого чаще всего производится в речных долинах, очень выгодно отличается от способа создания линз пресных подземных вод. Последние обычно имеют очень ограниченные эксплуатационные запасы и нередко сложные гидрогеохимические условия.

Общее направление разведочных гидрогеологических работ в связи с искусственным магазинированием подземных вод определяется главным образом геолого-экономическими предпосылками. Во-первых, исследования приходится выполнять в слабо изученных районах, где отсутствуют действующие водозаборные сооружения. Во-вторых, в данном случае разведочные гидрогеологические работы должны проектироваться для решения по существу двух задач:

а) изыскать источник и разведать благоприятную гидрогеологическую структуру для накопления поверхностных вод;

б) в пределах выбранной площади для магазинирования провести поиски и разведку наиболее благоприятного участка для строительства будущего водозаборного сооружения.

В связи с этим в каждом конкретном случае необходимо:

- а) иметь заявленную потребность в воде, которая определяет целевое назначение разведочных гидрогеологических работ;

- б) произвести предварительную оценку геоморфологических, геолого-структурных и гидрогеологических условий изучаемого района с целью оконтуривания перспективных площадей для аккумуляции поверхностных вод в природных подземных емкостях;

- в) выявить на перспективных площадях надежный источник магазинирования;

- г) составить проект разведочных гидрогеологических работ в полном его объеме на разведку благоприятной структуры для аккумуляции по изучению качества и количества источника питания, а также по разведке выбранного водозаборного участка;

- д) дать в предварительном виде гидрогеологическую и технико-экономическую оценку всего комплекса намечаемых мероприятий о целесообразности разведки и капитальных затрат по искусственному формированию подземных вод методом магазинирования.

Как видно из краткого перечня основных положений, решение проблемы магазинирования является сравнительно сложной и требует в каждом конкретном случае тщательной предварительной ее оценки. По существу содержания основных положений при магазинировании требуется более строго соблюдать принятый в нашей стране принцип стадийности разведки месторождений подземных вод.

Ниже приводится для каждой стадии перечень и краткая характеристика рационального комплекса основных видов разведочных гидрогеологических работ.

ИССЛЕДОВАНИЯ НА СТАДИИ ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТ

Стадия оценочных работ для рассматриваемой проблемы является ответственной, так как результаты исследований должны быть положены в основу разработки проекта поисково-разведочных гидрогеологических работ. Оценочные работы обычно проводятся камеральным путем без производства полевых исследований. В редких случаях сложность и ответственность изучаемого объекта может потребовать проведения специальных рекогносцировочных исследований на площади перспективного района, с целью контроля и проверки основных природных факторов, оценка которых была выполнена предварительно камеральным путем.

На этой стадии рекомендуется произвести сбор, обобщение и анализ имеющихся по изучаемому району геологических, гидрогеологических и гидрологических материалов. Комплексное обобщение и анализ материалов необходимо выполнить с целью

геолого-гидрогеологического районирования применительно к проблеме магазинирования поверхностного стока.

Очень важным элементом целевого районирования являются геоморфологические и геолого-структурные условия, определяющие наличие и распространение природной емкости и возможности рационального регулирования и накопления в изучаемом районе поверхностного стока. Сезонное или годовичное регулирование поверхностного стока можно рассматривать как надежный способ не только аккумуляции, но и предварительной подготовки воды для последующего магазинирования.

Не менее важным критерием для предварительной оценки перспективных участков является литологический состав, мощность и фильтрационные свойства горных пород, слагающих зону аэрации и зону полного водонасыщения.

Для зоны полного насыщения перспективного района необходимо выяснить, хотя бы в предварительном виде, мощность, условия залегания и распространения водоносного горизонта и химический состав подземных вод.

Масштабы карт районирования могут быть различными (от 1 : 50 000 до 1 : 200 000) в зависимости от площади исследований. Карта специализированного районирования может служить хорошей основой для проектирования на перспективных площадях комплекса поисковых геологических, гидрологических и гидрогеологических работ.

ИССЛЕДОВАНИЯ НА СТАДИИ ПОИСКОВЫХ РАБОТ

Когда по результатам оценочных работ определены перспективные площади для того или иного способа магазинирования, постановка поисковых работ с целью обоснования искусственного регулирования накопления и сработки емкостных запасов подземных вод должна быть выполнена по общепринятой методике.

Что же касается поисковых и последующих разведочных работ для искусственного создания линз пресных подземных вод, то перечень необходимых основных видов работ и методика их проведения в настоящее время разработаны очень слабо. В этом отношении можно дать только общие рекомендации. Эти рекомендации должны на каждом конкретном объекте выполняться творчески с учетом природных особенностей изучаемого объекта.

Как показывает практика, постоянный отбор емкостных запасов подземных вод с искусственным их периодическим магазинированием целесообразнее всего осуществлять непосредственно в речных долинах. Во-первых, при этих условиях можно иметь надежный, либо постоянно, либо временно действующий источник магазинирования — поверхностные воды реки. Во-вторых, в этом случае весьма простейшими являются мероприятия по интенсификации искусственно направленного питания подземных вод путем строительства несложных инженерных сооружений.

В-третьих, в речных долинах чаще можно обнаружить необходимую мощность и емкость водоносных пород.

На объектах периодического магазинирования поверхностного стока в природных подземных емкостях речных долин в поисковую стадию целесообразно выполнять определенные исследования.

1. Геофизические наземные исследования на всей перспективной площади выбранного объекта. Основное назначение геофизических исследований — изучить морфологию, условия залегания и площадь распространения водовмещающих пород. При этом важным параметром является мощность водоносного горизонта. Площади с наибольшими значениями мощности водоносных пород могут быть выбраны впоследствии для разведки собственно водозаборного сооружения.

Для решения перечисленных задач по изучению морфологии речной долины обычно применяются электропрофилирование и электротзондирование в рациональном сочетании с микросейсмическими исследованиями. Результаты геофизических исследований должны явиться надежной основой для размещения на перспективной площади бурения поисково-разведочных скважин.

2. Комплексная геолого-гидрогеологическая съемка перспективной площади с целью изучения условий формирования и распространения водоносного горизонта, а также последующего изучения режима подземных и поверхностных вод.

В процессе комплексного картирования важно изучить геоморфологию района и выявить, по данным поискового бурения, участки с благоприятными условиями инфильтрации поверхностных вод, в том числе оконтурить площади паводкового затопления площади надпойменной террасы. Пониженные в рельефе участки современных речных террас могут быть в дальнейшем использованы как естественные инфильтрационные бассейны для искусственного питания емкостных запасов подземных вод.

Масштаб комплексного картирования может быть выбран от 1 : 10 000 до 1 : 25 000 в зависимости от степени сложности строения речной долины и площади исследований.

Съемочные исследования необходимо сопровождать определенным объемом бурения гидрогеологических поисковых и картировочных скважин. Главное назначение поисково-картировочного бурения скважин состоит в том, чтобы подтвердить ранее выявленные геофизическими исследованиями площади распространения наибольшей мощности водоносного горизонта изучаемого объекта — той подземной емкости, которая необходима для искусственного накопления и интенсивного отбора подземных вод.

3. Опытнo-фильтрационные исследования на площади комплексной съемки с целью предварительного изучения основных гидрогеологических параметров водоносного горизонта и пород зоны аэрации. Основные гидрогеологические параметры пород определяются методом проведения опытных откачек из скважин и опытных наливов в шурфах (см. главу VIII).

4. Специальные гидрологические исследования с целью предварительного изучения источника искусственного питания емкостных запасов подземных вод. Главное назначение этих исследований состоит в выяснении режима годового и сезонного поверхностного стока реки, в том числе условий формирования паводкового стока (продолжительность паводка, расход, затопляемая площадь и др.) и твердого стока реки.

Одновременно с количественной характеристикой необходимо изучать и качество источника искусственного восполнения емкостных запасов подземных вод в соответствии с изложенными выше требованиями.

Комплексная оценка поверхностных вод в стадии поисковых работ обычно производится по материалам исследований гидрометслужбы нашей страны и дополнительных рекогносцировочных обследований, проводится контрольный отбор проб воды для производства различных анализов.

5. Изучение режима подземных и поверхностных вод. Если в стадии поисковых работ перспективность выбранной площади исследований не вызывает сомнений, то необходимо уже на данном этапе изучения объекта организовать на одном-двух участках стационарные наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод. Данные по режиму подземных и поверхностных вод впоследствии можно использовать для оценки некоторых гидрогеологических параметров, а также для предварительной характеристики качества и количества выбранного источника направленного искусственного магазинирования.

6. Камеральные работы по обработке, обобщению и предварительному анализу собранных материалов являются завершающими на первом этапе изучения объекта.

В процессе камеральных работ необходимо:

1) произвести выбор участков под разведку и инфильтрацию поверхностных вод, а также участка под размещение водоносного сооружения;

2) выполнить приближенными расчетами оценку общих перспектив выявленных участков;

3) в предварительном виде разработать рекомендации по технологической схеме искусственной инфильтрации поверхностных вод в условиях конкретного объекта магазинирования;

4) совместно с заинтересованными проектными организациями составить технико-экономический доклад об экономической целесообразности выбранного варианта водоснабжения. Предварительную оценку перспективности выявленных участков можно выполнить приближенными балансовыми расчетами.

В условиях искусственного регулирования емкостных запасов подземных вод эксплуатационный дебит постоянно работающего грунтового водозабора будет слагаться из следующих источников:

$$Q_a = Q_e + Q_n, \quad (VI.1)$$

где Q_3 — заданная производительность группового водозабора;
 Q_e — запасы подземных вод, накапливающиеся в водоносном горизонте под влиянием естественных источников питания;
 Q_n — запасы подземных вод, накапливающиеся в водоносном горизонте под влиянием искусственных источников питания.

Объем запасов подземных вод, накапливающийся под влиянием естественных источников питания, в пределах годовой амплитуды колебания уровня грунтовых вод может быть определен по следующему соотношению:

$$Q_e = 3,14h_e R_k^2, \quad (\text{VI.2})$$

где h_e — значение естественной годовой амплитуды колебания уровня грунтовых вод;

R_k — радиус влияния группового водозабора ($1,5 \sqrt{at}$).

Поскольку производительность группового водозабора является заданной величиной (общая заявленная потребность в воде объекта водоснабжения) и известна величина объема естественных запасов подземных вод, нетрудно определить требуемый общий объем искусственного питания подземных вод по разности между значениями Q_3 и Q_e .

Зная общую величину требуемого ежегодного объема искусственного питания подземных вод, можно определить требуемую емкость водовмещающих горных пород $V_{\text{пор}}$ для накопления этого объема

$$V_{\text{пор}} = \frac{Q_n}{\mu}, \quad (\text{VI.3})$$

где μ — коэффициент водоотдачи пород.

Определенный таким путем объем водоносных пород, необходимый для периодического накопления искусственных запасов подземных вод, и площадь влияния группового водозабора позволяют оценить величину искусственного колебания уровня подземных вод в год. Это колебание уровня будет формироваться под влиянием постоянного отбора в породах зоны периодического осушения водоносного горизонта и последующего восполнения запасов.

Общая годовая амплитуда колебания уровня будет складываться из естественного и искусственного ее значений

$$h_{\text{общ}} = h_e + h_n. \quad (\text{VI.4})$$

При предварительных балансовых расчетах необходимо учитывать, что значение $h_{\text{общ}}$ должно быть равно или меньше допустимого значения понижения уровня для данных конкретных условий, т. е. $S_{\text{доп}}$. Принято считать, что в среднем $S_{\text{доп}} \leq H_0$ (0,5—0,6) для безнапорных вод.

Если балансовые расчеты покажут, что для конкретного объекта $h_{\text{общ}} \leq S_{\text{доп}}$, то можно считать доказанным возможность создания искусственного регулирования емкостных запасов подземных вод.

В заключение предварительных балансовых расчетов целесообразно оценить необходимую площадь инфильтрации периодически действующих поверхностных вод для обеспечения искусственного воспроизводства емкостных запасов. При этом среднее значение скорости инфильтрации для предварительных балансовых расчетов можно принять от 0,5 до 1,0 м/сут.

В зависимости от выявленных геологических и гидрогеологических условий групповой водозабор для искусственного регулирования емкостных запасов подаваемых вод может быть либо сконцентрирован на небольшом участке, либо рассредоточен по площади.

ИССЛЕДОВАНИЯ НА СТАДИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ

Как ранее отмечалось, стадия предварительной разведки является наиболее ответственным этапом изучения объекта магазинирования. В эту стадию комплекс исследований проводится уже на конкретной площади выбранных участков под искусственную аккумуляцию и под разведку водозаборного сооружения. Вместе с тем в стадии предварительной разведки по существу должны быть принципиально оценены масштабы месторождения, его эксплуатационные возможности, условия искусственного регулирования емкостных запасов и их питание. Эксплуатационные запасы в связи с этим целесообразно разведать до промышленных категорий включительно (по категории В).

В связи с этим в стадию предварительной разведки целесообразно включить следующие виды работ и определенную последовательность их выполнения.

1. Детальная гидрогеологическая съемка (инструментальная) участков расположения направлений инфильтрации поверхностных вод и будущего водозаборного сооружения в масштабах от 1 : 10 000 должна сопровождаться дополнительными наземными геофизическими исследованиями, бурением гидрогеологических скважин, а также опытно-фильтрационными исследованиями с целью изучения степени водопроницаемости покровных отложений (пород зоны аэрации), водоносных пород, а также выявления степени фильтрационной неоднородности. Важно в процессе съемочных работ оценить степень затопления участка магазинирования паводковыми водами покровных отложений и наметить трассы обвалования участка инфильтрационного питания.

Комплекс таких исследований проводится обычными традиционными методами, достаточно детально рассмотренными во многих публикациях (Ф. М. Бочеве, И. В. Гарманов и др., 1965 г., Н. И. Плотников, 1973 г., и др.).

2. Детальное изучение качественной и количественной характеристики поверхностных вод и условий формирования режима сезонного или годовичного поверхностного стока. При этом целесообразно выполнять детальное качественное опробование поверхностных вод в соответствии с требованиями, изложенными

выше; оценивать значение и режим твердого стока поверхностных вод и санитарные условия изучаемого объекта. Все эти гидрологические и санитарно-бактериологические данные необходимы для выбора технологической схемы направленной инфильтрации поверхностных вод.

3. Бурение разведочных и наблюдательных гидрогеологических скважин целесообразно разместить на участке будущего водозаборного сооружения с целью его предварительной разведки. На этой стадии изучения необходимо на объекте выбрать наиболее рациональную для данных условий схему водозабора и разместить объемы разведочного бурения применительно к выбранной схеме.

Наблюдательные гидрогеологические скважины целесообразно предусмотреть на площади двух участков — магазинирования и водозабора с целью более детального изучения режима подземных вод.

Во всех разведочных скважинах рекомендуется провести комплекс каротажных геофизических исследований, в том числе резистивометровый каротаж и расходомерию. Данные геофизического каротажа должны быть в дальнейшем использованы для оценки фильтрационной неоднородности свойств водоносных пород в вертикальном разрезе.

4. Опытные откачки из разведочных скважин являются наиболее ответственными из всего комплекса разведочных гидрогеологических работ. Помимо того, что опытные исследования в разведочных скважинах с кустом наблюдательных выработок позволяют уточнить фильтрационные свойства водоносных пород, целесообразно подтвердить опытным путем расчеты по оценке эксплуатационных запасов подземных вод по промышленным категориям. Именно в соответствии с таким целевым назначением рекомендуется своевременно выбрать методику, наиболее подходящее время и продолжительность проведения опытных откачек, а в случае необходимости — опытно-групповую откачку. Групповую откачку по времени года целесообразно начать в конце периода независимого режима (когда отсутствует питание подземных вод) и завершить опытные работы в начальный период инфильтрации паводковых вод реки.

Как и в предыдущем случае, комплекс разведочных гидрогеологических работ в стадии предварительной разведки объекта завершается камеральной обработкой материалов с подсчетом эксплуатационных запасов и утверждением их в ГКЗ или ТКЗ.

Учитывая ответственность и целевое назначение стадии предварительной разведки, эксплуатационные запасы подземных вод в условиях периодического магазинирования поверхностного стока и искусственного регулирования емкости целесообразно оценить по сумме категорий $B + C_1 + C_2$. Эта сумма всех категорий запасов подземных вод должна быть не менее общего количества заявленной потребности.

ИССЛЕДОВАНИЯ НА СТАДИИ ДЕТАЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ

В связи с тем что в процессе предварительной разведки по существу должны быть решены все основные принципиальные положения по месторождению в целом, в том числе по оценке эксплуатационных запасов подземных вод и режиму магазинирования, разведочные гидрогеологические работы в стадии детального изучения объекта рекомендуется объединить со стадией строительства водозаборного и инженерных сооружений. Это позволит сократить сроки разведки объекта, что очень важно с точки зрения повышения общей эффективности разведочных гидрогеологических работ. Вместе с тем могут быть совмещены объемы разведочного и эксплуатационного бурения скважин на участке водозаборного сооружения, что также приведет к сокращению объемов ассигнований.

Длительную опытно-эксплуатационную откачку из группы буровых скважин, необходимую для перевода разведанных запасов в высшие категории по степени достоверности, можно совместить с очередным пуском в эксплуатацию пробуренных на водозаборе каптажных выработок.

Таким образом, детальная разведка по своей направленности и объемам работ на изучаемом объекте должна быть выполнена в условиях конкретного проектирования водозаборного сооружения. Целевое назначение детальной разведки объекта должно быть подчинено решению следующей основной задачи: перевод ранее разведанных запасов в промышленные категории, в первую очередь, в количестве заявленной потребности (перевод запасов из категорий C_1 и C_2 в категорию В, а затем категории В в категорию А) с целью обоснования рациональных условий эксплуатации подземных вод с учетом магазинирования поверхностных вод и регулирования их постоянного отбора.

Для решения этой главной гидрогеологической задачи целесообразно выполнить комплекс детальных исследований.

Провести бурение на водозаборном участке эксплуатационных скважин применительно к проектной схеме размещения каптажных выработок. Количество разбуренных эксплуатационных скважин должно быть согласовано с заинтересованной организацией с учетом решения главной задачи детальной разведки и первой очереди эксплуатации водозабора.

Необходимо выполнить эксплуатационное опробование всех пробуренных на водозаборе каптажных выработок в объеме требований так называемых «строительных откачек», а также бурение наблюдательных скважин по опорной сети, проект которой должен быть разработан совместно с проектом детальной разведки объекта.

Провести опытную эксплуатацию водозаборного сооружения в соответствии с планом работ заинтересованной организации и наблюдение за ее режимом. Как показывает практика, почти

во всех случаях строительства водозаборного сооружения возникает необходимость поочередного пуска скважин в эксплуатацию, по мере их готовности. В связи с этим, опытную одно-двухлетнюю частичную эксплуатацию каптажного сооружения следует рассматривать как длительную групповую откачку, данные по которой и позволят решить основную задачу детальной разведки — перевод запасов подземных вод в промышленные категории.

Очень важной является организация и проведение на объекте стационарных исследований по изучению режима подземных и поверхностных вод. В комплексе стационарного изучения режима целесообразно включить наблюдение за расходами всех эксплуатационных скважин, динамикой уровня подземных вод в зоне депрессионной воронки, с температурой и качеством воды; условие затопления надпойменной террасы поверхностными водами и режим выполнения сработанных запасов за качеством поверхностных вод.

Результаты стационарного изучения режима подземных вод позволят не только регулировать рациональные условия их эксплуатации, но и решить вопрос о возможном увеличении общей производительности водозабора.

Как показывает опыт, в подавляющем большинстве случаев в процессе длительной эксплуатации в связи с увеличением водопотребления возникает необходимость дальнейшего расширения водозаборных сооружений для увеличения их производительности.

Детальная разведка завершается камеральной обработкой материалов. Последняя должна быть выполнена с целью их обобщения, пересчета эксплуатационных запасов подземных вод, а также прогнозной количественной оценки возможного увеличения производительности водозаборного сооружения с учетом интенсификации искусственного магазинирования поверхностных вод.

РАЗВЕДКА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО СОЗДАНИЯ ЛИНЗ ПРЕСНЫХ ВОД

В этом направлении в нашей стране были проведены только опытные разведочные гидрогеологические исследования в аридной зоне Туркмении. В промышленном масштабе работы, к сожалению, не получили развития. Поэтому общепринятой методики проведения всего комплекса разведочных и опытных работ в связи с искусственным созданием линз пресных вод в породах зоны аэрации или полного насыщения пока не разработано. Для проведения комплекса гидрогеологических исследований в указанном направлении можно пользоваться работой И. С. Глазунова и Н. В. Роговской (1968).

ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОСПОЛНЕНИИ ИХ ЗАПАСОВ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Изучение режима подземных вод в процессе разведки объекта искусственного формирования подземных вод, строительства инженерных сооружений, а также эксплуатации водозабора с учетом его дополнительного питания является очень важным видом поисково-разведочных работ.

Целевое назначение этих исследований, четко определяющее общее направление работ, следующее:

1) изучение естественного режима подземных вод и его преобразование на площади каптажного сооружения под влиянием искусственного воспроизводства и длительной эксплуатации водозабора;

2) изучение режима поверхностных вод (источника искусственного питания);

3) сравнительная оценка гидрогеологических прогнозных данных разведки и опыта эксплуатации водозабора, работающего в условиях искусственного питания;

4) уточнение принятой по проекту технологической схемы воспроизводства искусственных запасов подземных вод;

5) переоценка эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборном участке с учетом их искусственного воспроизводства (перевод запасов из низших в высшие категории), а также уточнение оптимального режима работы инфильтрационных сооружений;

6) систематический контроль за качеством источника искусственного питания и подземных вод;

7) накопление опыта гидрогеологических работ по искусственному формированию подземных вод в различных природных условиях, которые могут служить хорошей основой для дальнейшего совершенствования методики проведения поисково-разведочных работ.

Как вытекает из перечисленных выше задач, исследования по изучению режима подземных и поверхностных (источника искусственного питания) вод должны быть комплексными. В этот комплекс целесообразно включить: изучение уровня, расхода, температуры, качества подземных и поверхностных вод, химического и санитарно-бактериологического состава на водозаборе,

включая инфильтрационные сооружения (открытого и подземного типов) и головное сооружение каптажа поверхностных вод.

В процессе разведки объекта исследования проводятся с целью изучения естественного (ненарушенного) режима подземных вод, а именно:

а) получения исходных данных, характеризующих начальные гидрогеологические условия изучаемого объекта;

б) дополнительного определения (по данным наблюдений за режимом подземных вод) расчетных гидрогеологических параметров пласта;

в) определения годовой амплитуды колебания уровня грунтовых вод и выбора допустимой величины понижения уровня при оценке эксплуатационных запасов;

г) уточнения граничных условий водоносного горизонта на участке проектируемого водозабора, а также будущих инфильтрационных сооружений, в том числе уточнения степени гидравлической связи подземных и поверхностных вод;

д) оценки режима химического состава подземных вод в естественных условиях их залегания.

Весь комплекс стационарных наблюдений за режимом подземных и поверхностных вод в стадии разведки объекта строго регламентируется требованиями действующей инструкции ГКЗ СССР. Без необходимого объема материалов по изучению режима ГКЗ СССР не рассматривает и не утверждает разведанные запасы подземных вод.

Существует довольно четкая регламентация и в части изучения режима подземных вод в период строительства и эксплуатации подземных вод. В нашей стране в этом направлении действует положение, согласно которому производство всего комплекса работ по стационарному изучению режима подземных и поверхностных вод на водозаборных участках осуществляется силами и средствами службы эксплуатации каптажных сооружений. Изложены определенные требования в этом отношении и в «Основах водного законодательства Союза ССР и союзных республик».

Все это вместе взятое дает основание считать, что стационарные исследования режима подземных и поверхностных вод являются юридически правомерными на всех стадиях изучения и эксплуатации водозабора, в том числе с учетом искусственного его питания.

Задача состоит в том, чтобы строго соблюдать требования народного хозяйства и во всех случаях использовать юридическое право в части систематического изучения режима подземных и поверхностных вод, значение которого трудно переоценить в теоретическом и прикладном направлениях.

В стадии эксплуатации водозаборных сооружений расширяется круг задач по комплексному изучению режима поверхностных и подземных вод.

Выше неоднократно подчеркивалось, что в процессе длитель-

ной эксплуатации подземных вод на площади влияния каптажных сооружений происходят значительные изменения естественных гидрогеологических условий, может быть нарушена форма гидравлической связи подземных и поверхностных вод, изменится качество подземных вод и граничные условия потока в плане и разрезе. При нарушении условий могут возникнуть процессы загрязнения подземных вод и истощения их запасов и др.

Общие задачи по изучению режима подземных и поверхностных вод на участках действующих водозаборов в процессе их эксплуатации могут быть сформулированы следующим образом:

1) изучение условий эксплуатации подземных вод и формирование в пространстве и во времени депрессионной воронки сниженных уровней подземных вод на всей площади ее распространения;

2) уточнение и определение основных расчетных гидрогеологических параметров продуктивного водоносного горизонта;

3) контроль за качеством подземных и поверхностных вод, за работой инфильтрационных сооружений и рациональными условиями эксплуатации;

4) разработка дополнительных мероприятий по охране окружающей среды в связи с длительной эксплуатацией подземных вод.

В настоящее время в нашей стране накоплен большой опыт изучения режима подземных вод. Разработана ВСЕГИНГЕО общепринятая методика проведения исследований по изучению естественного и нарушенного режима подземных и поверхностных вод; имеются типовые конструкции оборудования наблюдательных точек (скважин, колодцев, гидрометрических постов и др.), налажен серийный выпуск измерительной аппаратуры; разработана первая очередь автоматизированной системы учета и обработки массовой информации по режиму подземных вод (система «АИПС — Режим» — ВСЕГИНГЕО).

Во многих публикациях приводятся методические рекомендации по организации наблюдательной сети, ее оборудованию, размещению на объекте и др. (Коноплянцев, 1967; Ковалевский, 1968, и др.).

Это положение позволяет в настоящем разделе монографии изложить только основные положения и принципы организации и размещения наблюдательной сети с целью изучения режима подземных вод применительно для стадии эксплуатации водозаборных и каптажных сооружений.

Рассмотрим гидрогеологические принципы, которые должны быть положены в основу проектирования сети наблюдательных выработок или пунктов для изучения режима подземных и поверхностных вод на объектах, где водозаборные сооружения имеют искусственное формирование запасов подземных вод.

Первым очень важным принципом в этом отношении является учет граничных условий формирования фильтра-

дионного потока в плане и разрезе. При этом рекомендуется учитывать расположение водозабора и инфильтрационных сооружений относительно границ области естественного и искусственного фильтрационного потока в плане, а также относительно границ раздела потока в вертикальном разрезе, особенно в случаях сложных гидрогеохимических условий.

Граничные условия фильтрационного потока — это комплекс природных и искусственно созданных факторов, характеризующих связь потока подземных вод с окружающей геологической, гидрогеологической, гидрологической и санитарно-бактериологической средой. Эти природные и искусственные факторы оказывают существенное влияние на дебит водозаборного сооружения, режим и структуру фильтрационного потока, а также на формирование качества подземных вод в период их длительной эксплуатации.

К геологическим факторам следует отнести условия залегания и распространения горных пород, литологический состав продуктивного водоносного горизонта, а также подстилающих и перекрывающих его слоев; тектоническую нарушенность, условия обводненности и др. К гидрогеологическим факторам следует отнести водопроницаемость пород продуктивного горизонта, его фильтрационную неоднородность в плане и разрезе, условия естественного и искусственного питания, связь продуктивного горизонта с другими водоносными комплексами, с атмосферой и поверхностными водами.

Наконец, к санитарно-бактериологическим факторам следует отнести расположение естественных и искусственных очагов загрязнения, которые могут быть распространены на поверхности, непосредственно в продуктивном горизонте или в водоносном комплексе.

Таким образом, граничные условия фильтрационного потока по существу определяют закономерности формирования режима уровня подземных вод в естественной и особенно в нарушенной гидрогеологической обстановке, в том числе на водозаборном участке.

Имеющиеся данные показывают, что наиболее интенсивно границы потока в плане оказывают влияние на режим уровня в период длительной эксплуатации подземных вод, когда коренным образом нарушаются природные гидрогеологические условия.

Именно поэтому в период длительного водоотбора стационарное изучение режима подземных вод приобретает очень большое значение для решения задач по обоснованию рациональных условий их эксплуатации.

Вторым очень важным принципом в размещении сети наблюдательных пунктов является учет фильтрационной неоднородности продуктивного водоносного горизонта. Фильтрационная неоднородность, особенно в плане, оказывает существенное влияние на структуру фильтрационного потока подземных

вод и прежде всего в условиях нарушенного режима. В некоторых случаях фильтрационная неоднородность может рассматриваться как граничные условия потока второго или третьего порядков.

Третьим принципом является учет степени сложности гидрогеохимических условий потока в плане и в разрезе. К гидрогеохимическим условиям можно отнести такие факторы, как близкое залегание на водозаборном участке подземных вод повышенной минерализации, близкое расположение искусственных очагов возможного химического или бактериального загрязнения подземных вод или источника искусственного питания и др.

Четвертый принцип предусматривает необходимость полноты исследований и относительно равномерного изучения нарушенного режима фильтрационного потока в период длительной эксплуатации подземных вод. Требования этого принципа состоят в том, чтобы стационарными наблюдениями была охвачена вся площадь влияния водозаборного сооружения, в том числе и зона санитарной охраны.

Пятый принцип предусматривает стадийность в изучении режима подземных вод с последовательным наращиванием гидрогеологической информации от стадии поисков разведки к стадии длительной эксплуатации объекта. При этом этап длительной эксплуатации водозабора целесообразно также рассмотреть по отдельным этапам, по мере развития депрессионной воронки и влияния эксплуатации подземных вод на окружающую среду. В соответствии с этим следует постепенно наращивать объем гидрогеологической информации по режиму подземных вод.

ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Из всех параметров режима наиболее чувствительным к различным воздействиям на фильтрационный поток является уровень подземных вод. Любое изменение темпов отбора, граничных условий, изменение условий питания или гидрогеологической неоднородности пласта очень быстро отражается на режиме уровня подземных вод. Причем каждый из перечисленных факторов по своему оказывает влияние на характер изменения уровня подземных вод в пространстве и во времени. Именно поэтому результаты наблюдений за режимом уровня позволяют детально изучить динамику и структуру фильтрационного потока.

Исходя из этого очень важного положения, стационарные наблюдения за режимом уровня подземных вод и уровня поверхностных вод на водозаборном участке являются обязательными и первоочередными.

В части обработки материалов по режиму уровня подземных вод наиболее ценной является одна из распространенных форм обобщения — составление карт гидроизогипс (или гидроизопьез). Такие карты целесообразно составлять отдельно для условий

естественного и нарушенного опытными работами (опытной эксплуатацией) режима.

Карты гидроизогипс позволяют изучить не только динамику фильтрационного потока, но и определить площадь распространения депрессионной воронки (площадь влияния водозаборного сооружения на режим естественного потока). Карта гидроизогипс несет гидрогеологическую информацию, исходные данные которой могут быть использованы для оценки такого важного параметра продуктивного водоносного горизонта, как коэффициент гравитационной водоотдачи (или упругой водоотдачи).

Данные по общей площади районной депрессии и суммарному водоотбору позволяют для водозаборного участка определить модуль эксплуатационных запасов и, следовательно, оценить эффективность мероприятий по искусственному воспроизводству запасов подземных вод. Для этой цели может быть использована простая зависимость:

$$\mu_э = \frac{\sum Q}{F}, \quad (\text{VII.1})$$

где $\mu_э$ — модуль эксплуатационных запасов подземных вод, м³/сут на 1 км²;

$\sum Q$ — суммарный дебит водозаборного сооружения (среднее значение за время наблюдений), м³/сут;

F — общая площадь районной депрессионной воронки, определенная на карте гидроизогипс, км².

Модуль эксплуатационных запасов подземных вод конкретных водозаборов можно также использовать для сравнительной оценки их работы.

Следует также учитывать, что карты гидроизогипс (гидроизопьез), составленные для условий естественного и нарушенного режима подземных вод, являются очень важной исходной гидрогеологической информацией для решения ряда методических и прикладных задач с помощью современных методов математического моделирования на АВМ и ЭЦВМ.

Имеющийся опыт показывает, что по данным изучения режима уровней подземных и поверхностных вод можно четко установить характер гидравлической связи между ними (рис. 39, а, б).

Целенаправленное расположение наблюдательных скважин вблизи водоема или водотока (расположение скважин по потоку подземных вод, направленному к реке) позволяет определить по данным режимных наблюдений значение гидравлического сопротивления русловых отложений реки. Этот параметр является важным для оценки эксплуатационных запасов подземных вод в некоторых речных долинах, в том числе при искусственном их восполнении.

Как видно из вышеизложенного, изучение режима подземных вод должно быть организовано в самый начальный период раз-

ведки объекта. Очень важным параметром для оценки режима действующего водозабора являются данные по дебиту эксплуатационных скважин и производительности инфильтрационных сооружений при искусственном восполнении запасов подземных вод. Поэтому при разведке объекта и тем более при эксплуатации водозаборов должно быть четко организовано стационарное изучение дебита всех скважин и всех инфильтрационных сооружений, а также источника искусственного воспроизводства запасов подземных вод. Современные технические средства (расходомеры) позволяют организовать непрерывные наблюдения за дебитом

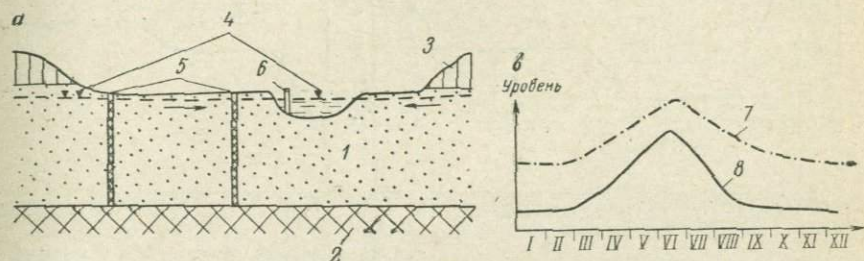


Рис. 39. Характер гидравлической связи подземных и поверхностных вод, установленный по данным режимных наблюдений.

a — разрез долины; *б* — графики режима. 1 — водоносные пески; 2 — водопроницаемые породы; 3 — суглинки; 4 — уровни поверхностных и подземных вод; 5 — наблюдательные скважины, оборудованные фильтрами; 6 — наблюдательная рейка на реке; 7 — график режима уровня подземных вод; 8 — график режима уровня поверхностных вод

каждой скважины и производительностью отдельных инфильтрационных сооружений, а также установить суммарный дебит каптажа в целом.

Режим дебита водозабора и режим уровня подземных вод — два параметра, которые позволяют решить ряд важных гидрогеологических задач по анализу эксплуатации водозабора. Прежде всего по данным режимных наблюдений целесообразно установить графическим путем зависимость режима уровня подземных вод от темпов водоотбора (рис. 40, 41). Аналогичные графики должны быть построены и для инфильтрационных бассейнов. Такие графики позволяют определить режим фильтрационного потока в целом, сформированного на водозаборном участке, а также оценить темпы снижения уровня, что важно для выбора рациональных условий эксплуатации подземных вод.

На рис. 40, *a* приведен график, характеризующий стационарный режим фильтрационного потока на водозаборном участке. Несмотря на то, что после двухлетней эксплуатации был увеличен темп суммарного отбора в 1—5 раз, уровни подземных вод после изменения дебита вначале стали снижаться, а затем вновь стабилизировались. Такая структура графика $S = f(\Sigma Q)$ характеризует высокую степень обеспеченности питанием продуктивного

горизонта. Режим эксплуатации в этих условиях является наиболее рациональным.

На графике рис. 40, б четко прослеживается явная тенденция постоянного снижения уровня подземных вод в процессе эксплуатации при двух темпах суммарной производительности водозабора. Продуктивный горизонт в данном случае является напор-

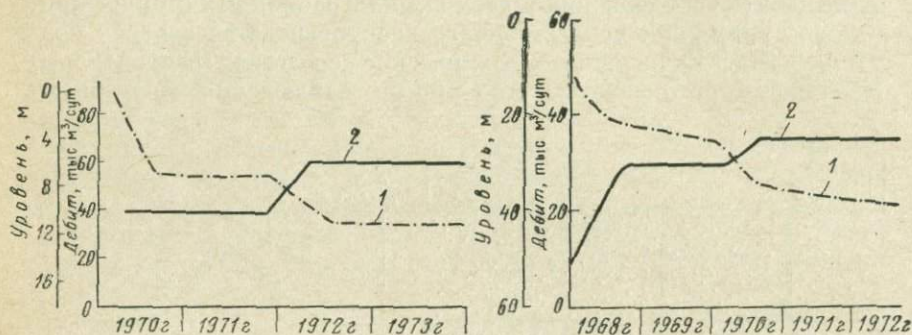


Рис. 40. Графики зависимости снижения уровня подземных вод от величины их отбора из продуктивного горизонта.

1 — кривая снижения уровня подземных вод (в центре водозабора); 2 — кривая значений суммарного дебита водозабора

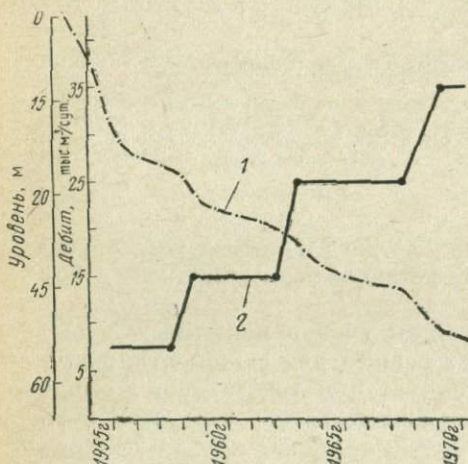


Рис. 41. График режима уровня подземных вод и суммарной производительности водозабора.

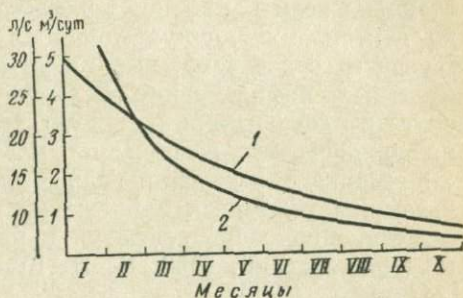
1 — кривая снижения уровня подземных вод; 2 — кривая роста суммарного дебита водозабора

ным и слабо обеспечен естественным питанием. При наметившихся темпах снижения уровня подземных вод (5 м в год) на водозаборном участке может произойти истощение запасов и возможное изменение их качества. В таких условиях неустановившегося режима фильтрации потока для обеспечения постоянного отбора на длительный срок эксплуатации требуется организация искусственного воспроизводства запасов подземных вод — эффективного средства против истощения запасов.

На рис. 41 представлен график режима уровня подземных вод и суммарной производительности водозабора, который характеризует неприемлемые и нерациональные условия эксплуатации подземных вод. Непрерывный рост суммарной производительности

водозабора вызвал с различными темпами непрерывные снижения уровня подземных вод. В таких условиях очень сложно анализировать режим работы водозабора и невозможно оценить тенденции и темпы снижения уровня в зависимости от темпов водоотбора (две переменные во времени функции).

Рис. 42. График режима скорости инфильтрации в бассейне (1) и дебита нагнетательной скважины (2)



Целесообразно в аналогичных примерах установить постоянный темп суммарного водоотбора, выявить зависимость по графику $S = f(\sum Q)$ и затем путем его анализа решить вопрос о дальнейшем и более рациональном условии эксплуатации.

Данные наблюдений за уровнем подземных вод (скорости инфильтрации) и дебиту инфильтрационных бассейнов могут позволить проанализировать режим работ инженерных сооружений, изучить степень кольматации данных отложений бассейнов или фильтров нагнетательных скважин, оценить образование илливой пленки.

Выше отмечалось, что режим работы инфильтрационных бассейнов при искусственном воспроизводстве запасов подземных вод во многом определяется условиями и скоростью образования илливой пленки и кольматации фильтрующего слоя.

Режим работы нагнетательной скважины также четко определяется скоростью «зарастания фильтра», которое происходит под влиянием физических, химических и биологических процессов.

В связи с этим целесообразно своевременно проводить анализ данных режимных наблюдений. Существуют различные методы анализа, из которых наиболее ценным является построение различных графиков зависимости основных параметров режима — уровня подземных вод, скорости инфильтрации и производительности инфильтрационных сооружений.

На рис. 42 представлены графики изменения во времени скорости инфильтрации на площади инфильтрационного бассейна и режима дебита нагнетательной скважины. Анализ режимных наблюдений позволяет принять своевременные меры к восстановлению производительности инфильтрационных сооружений (чистка бассейнов, ремонт скважин и др.).

Данные по режиму уровней подземных вод и суммарному водоотбору позволяют не только проанализировать условия эксплуа-

тации подземных вод, но и уточнить основные гидрогеологические параметры продуктивного горизонта на всей площади влияния водозабора.

Таким образом, по данным режимных наблюдений можно получить в полном объеме характеристику фильтрационного потока на всем комплексе водозаборных сооружений. Это важно для переоценки эксплуатационных запасов подземных вод действующего водозабора, выбора участков для размещения дополнительных инфильтрационных сооружений с целью усиления искусственного питания продуктивного горизонта или обоснования дальнейшего расширения каптажных сооружений.

Методика определения гидрогеологических параметров пласта по данным режимных наблюдений на действующих водозаборах достаточно подробно освещена в ряде опубликованных монографий (Ковалевский, 1968; Н. Н. Биндеман, Л. С. Язвин, 1971 г.; Плотников, 1973).

Однако следует напомнить, что во всех случаях решения прикладных задач необходимо вначале произвести преобразование гидрогеологических условий водозаборного участка в расчетную схему, которую можно рассматривать как приближенную гидрогеологическую модель. Затем в соответствии с выполненной схематизацией произвести выбор готовых аналитических решений, отвечающих условиям приближенной модели для решения поставленных задач.

На площади некоторых водозаборных участков конфигурация граничных условий потока в плане может оказаться очень сложной. Приближенная модель для таких сложных условий может не соответствовать ни одной из типовых расчетных схем, для которых имеются готовые аналитические решения. В таких случаях гидрогеологические параметры пласта по данным режимных наблюдений на действующем водозаборе целесообразно определять с помощью моделирования на современных АВМ.

Следующим очень важным направлением стационарных исследований режима является изучение качества подземных вод и санитарно-бактериологических условий водозаборного участка.

Как известно, для водоснабжения и искусственного воспроизводства запасов к подземным и поверхностным водам предъявляются определенные требования к их качеству. Задача стационарных исследований в этом направлении состоит в постоянном контроле за качеством подземных вод продуктивного водоносного горизонта и поверхностных вод как источника искусственного питания, а также смешанных вод на водозаборе.

Режим качества подземных и поверхностных вод контролируется на водозаборном участке методом систематического отбора проб воды для производства анализов на химический состав, содержание вредных компонентов, на бактериологический состав, а также для определения физических свойств источника искусственного воспроизводства запасов подземных вод.

Наиболее тщательный и сравнительно частый отбор проб воды для производства различных видов анализов производится при сложных гидрогеохимических условиях на площади влияния водозаборных участков — близкое залегание подземных вод повышенной минерализации, или близкое расположение искусственных очагов загрязнения подземных вод продуктивного горизонта и др.

При этом наблюдения за загрязнением подземных вод должны производиться не только для оценки скорости перемещения контура соленых или загрязненных вод в продуктивном водоносном горизонте, но и для изучения процессов возможного самоочищения загрязнений (процессов сорбции отдельных элементов загрязнений, разубоживания и др.). Для этого целесообразно проводить натурные и лабораторные исследования.

Важным мероприятием по охране качества подземных и поверхностных вод является периодическое рекогносцировочное обследование с целью изучения санитарно-бактериологических условий, площади влияния водозаборного и инфильтрационных сооружений и прилегающей территории. Результаты таких исследований позволяют своевременно разрабатывать рекомендации по предотвращению возможного ухудшения качества подземных и поверхностных вод, а также определяют необходимость заложения специальной дополнительной режимной сети скважин.

В процессе контрольной рекогносцировки целесообразно не только провести визуальное обследование территории, но и выполнить разовое опробование качества поверхностных и подземных вод. Результаты рекогносцировочных обследований рекомендуется систематически отражать на дежурной гидрогеологической карте района расположения водозаборного сооружения. Это позволит изучить динамику изменения качества окружающей среды во времени и, в первую очередь, на площади зон санитарной охраны.

В зависимости от конкретных гидрогеологических и гидрологических условий искусственного воспроизводства запасов подземных вод рекогносцировочное обследование можно проводить один или два раза в год.

Следует подчеркнуть, что периодическое рекогносцировочное обследование территории, тяготеющей к площади расположения водозаборных сооружений и площади влияния на режим фильтрационного потока, при искусственном воспроизводстве запасов подземных вод должно быть неотъемлемой частью общего комплекса изучения режима. Это требование обуславливается тем, что возможное ухудшение качества источника искусственного питания, обнаруженное в процессе рекогносцировки, может оказать влияние на изменение качества подземных вод продуктивного горизонта.

Как в предыдущем случае, данные по изучению режима качества подземных и поверхностных вод целесообразно анализировать

с помощью построения различных графиков (графо-аналитический метод обобщения материалов).

В качестве примера приведем график режима общей минерализации подземных вод в процессе длительной их эксплуатации на одном из действующих водозаборов (рис. 43).

Общая минерализация подземных вод является хорошим индикатором изменения граничных условий продуктивного горизонта в процессе длительной его эксплуатации. Это положение очень отчетливо подтверждается данными приведенного графика.

Режимными наблюдениями на водозаборе было установлено, что в первые шесть лет эксплуатации подземных вод не отмечалось

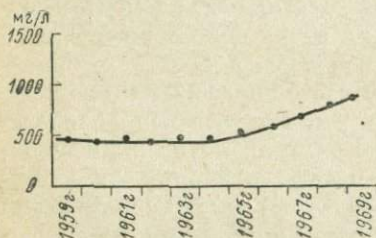


Рис. 43. График режима общей минерализации подземных вод в процессе их длительной эксплуатации

изменения их общей минерализации. Затем (после 1965 г.) в течение четырех лет было обнаружено заметное постепенное увеличение общей минерализации подземных вод от 490 почти до 900 мг/л, т. е. минерализация увеличилась вдвое. Дальнейший рост минерализации мог бы превысить допустимое значение по ГОСТу для питьевых вод (до 1 г/л). В связи с этим на площади водозабора были предприняты детальные гидрогеохимические исследования. В результате этих исследований были выявлены очаги перетекания ниже залегающих подземных вод повышенной минерализации в продуктивный горизонт через разделяющие слои (комковатая глина). Мощность слоев на некоторых участках оказалась незначительной — от 2 до 5 м, против 30 м в региональном плане.

Результаты режимных наблюдений и анализ дополнительных гидрогеологических исследований были положены в основу решения двух очень важных задач для данных конкретных условий:

а) изменения режима общего водоотбора подземных вод с целью восстановления их качества;

б) выбора участка для возможного расширения действующего водозабора с целью удовлетворения дополнительной потребности в воде.

Не менее чувствительным индикатором при оценке режима подземных вод является их температура. Было установлено, что влияние температуры внешней среды (солнечной радиации) Земли довольно устойчиво отмечается преимущественно на глубине до 25 м от поверхности (глубина активного воздействия внешней среды). Ниже этой глубины влияние энергии солнца заметно уменьшается и наибольшая амплитуда колебания температуры

фиксируется высокочувствительными приборами. На больших глубинах залегания, особенно в районах молодой вулканической деятельности, существенное влияние на температурный режим подземных вод оказывает внутреннее тепло земной коры.

Вертикальная гидротермическая зональность земной коры накладывает свое влияние на выбор общего направления, организацию и методику проведения исследований температурного режима подземных вод на водозаборных участках (Н. М. Фролов, 1971 г.).

Так, например, стационарные измерения температуры грунтовых вод неглубокого залегания (в пределах глубины активного влияния внешней среды 25 м) проводятся на водозаборных сооружениях преимущественно для решения прикладных задач, связанных с выбором наиболее рациональных условий их эксплуатации и охраны. В таких гидрогеологических условиях замеры температуры воды производятся обычно в те же дни, что и регистрация уровня грунтовых вод.

По данным исследований температурного режима грунтовых вод могут быть приближенно решены следующие прикладные задачи, важные для оценки работы водозаборного сооружения при искусственном воспроизводстве запасов:

- 1) количественная оценка взаимодействия грунтовых и поверхностных вод на инфильтрационных каптажных сооружениях по соотношению их расходов на водозаборе;

- 2) режим производительности инфильтрационных сооружений на водозаборе с искусственным питанием.

Эта оценка основывается на данных, характеризующих различную температуру поверхностных и подземных вод и температуру смешанных вод в эксплуатационных скважинах (Ковалевский, 1968).

При эксплуатации напорных вод более глубокого залегания стационарное изучение температурного режима производится главным образом с целью изучения их генезиса, а также приближенной оценки условий искусственного воспроизводства эксплуатационных запасов.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Выше кратко были изложены основные принципы размещения наблюдательной сети с целью изучения режима подземных и поверхностных вод, которые рекомендуется использовать при организации стационарных исследований. Ранее отмечалось, что стандартные схемы размещения наблюдательной сети для весьма разнообразных природных условий расположения разведочных или водозаборных участков являются неприемлемыми и не могут быть использованы на практике. Изучение режима, так же как и весь комплекс разведочных работ, требует творческого подхода.

Приведем некоторые рекомендации по наиболее рациональному размещению наблюдательных выработок для конкретной

обстановки применительно к ранее изложенной типизации условий искусственного формирования подземных вод (см. табл. 1). Как следует из таблицы для первой типовой схемы эксплуатационный дебит водозаборов (или проектный дебит скважины на разведочном участке) формируется за счет искусственно привлекаемых запасов путем береговой инфильтрации поверхностных вод.

В гидрогеологическом отношении для таких типовых схем характерен стационарный режим фильтрационного потока при эксплуатации водозабора и активная форма гидравлической связи подземных и поверхностных вод (благоприятные условия для искусственного привлечения запасов).

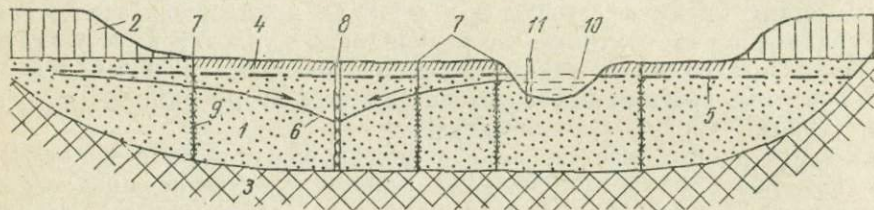


Рис. 44. Схема размещения наблюдательной сети в поперечном сечении инфильтрационного водозаборного сооружения.

1 — водонесущие пески; 2 — покровные суглинки; 3 — водопроницаемые породы; 4 — почвенный слой; 5 — уровень грунтовых вод до эксплуатации; 6 — депрессионная воронка; 7 — наблюдательные скважины; 8 — эксплуатационная скважина водозабора; 9 — фильтр скважины; 10 — река; 11 — наблюдательная рейка

Эти две предпосылки по существу и предопределяют условия размещения наблюдательной сети для изучения режима подземных и поверхностных вод. Выше отмечалось, что в процессе эксплуатации на водозаборном участке в русловых отложениях реки может происходить образование илистой пленки и кольматация пород фильтрующего слоя. В связи с этим постепенно может возрастать гидравлическое сопротивление русловых отложений реки и ухудшаться условия инфильтрационного питания эксплуатационных скважин. Дебит водозабора при этом может снижаться.

Надежным методом достоверного прогноза указанных техногенных процессов является исследование режима уровней подземных и поверхностных вод и дебита эксплуатационных скважин на водозаборном участке.

Эти два параметра очень чувствительно реагируют на изменение режима гидравлической связи подземных и поверхностных вод, т. е. режима искусственного питания каптажных выработок.

Исходя из сказанного, сеть наблюдательных выработок на водозаборных участках целесообразно размещать в виде наблюдательных поперечников (рис. 44).

Примерно такие же условия могут быть положены в основу размещения наблюдательной сети и для второй типовой схемы формирования искусственных запасов подземных вод. Водозабор в этом случае имеет двухстороннее искусственное питание —

с одной стороны река, а с другой инфильтрационный бассейн, или питание со стороны двух рядов инфильтрационных бассейнов, между которыми может быть расположен линейный ряд водозаборных скважин (рис. 45).

Как отмечалось выше, при эксплуатации инфильтрационных бассейнов всегда образуется илистая пленка и закольматированный слой в фильтрующей среде. Вследствие этого происходит постепенное снижение общей производительности бассейнов, а следовательно, уменьшение величины искусственного питания эксплуатационных скважин. Эти процессы могут быть четко зафиксированы при стационарном изучении режима уровней под-

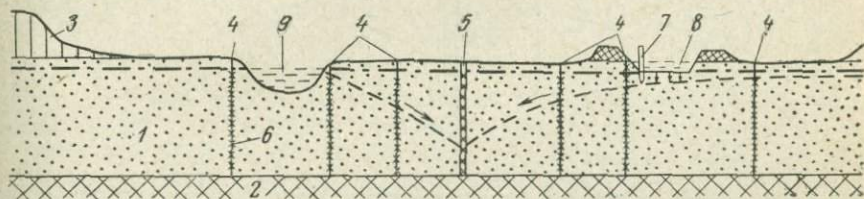


Рис. 45. Схема расположения наблюдательных скважин на водозаборном участке с искусственным источником питания.

1 — водоносные пески; 2 — водонепроницаемые породы; 3 — покровные суглинки; 4 — наблюдательные скважины; 5 — эксплуатационная скважина водозабора; 6 — фильтр скважины; 7 — наблюдательная рейка; 8 — инфильтрационный бассейн; 9 — река

земных вод, а также расхода подаваемой в бассейн сырой воды и дебита водозаборных скважин. В данных условиях наблюдательную сеть также рекомендуется размещать по системе режимных поперечников, охватывающих водозабор, инфильтрационные бассейны и фронт развития депрессионной воронки.

Несколько иной подход к размещению наблюдательной сети требуется применить к изучению режима подземных вод для третьей типовой схемы искусственного формирования эксплуатационных запасов подземных вод (см. табл. 1). Для этой схемы характерно искусственное регулирование емкостных запасов (преимущественно системой площадных водозаборов) и периодическая инфильтрация паводковых расходов реки по площади развития депрессионной воронки.

В связи с этим наблюдательную сеть буровых скважин для изучения режима подземных вод целесообразно размещать по площади всего водозабора. Некоторые рекомендации в этом отношении можно извлечь из опыта изучения режима подземных вод на действующем Северном площадном водозаборе.

Особенно творческий подход к организации наблюдательной сети должен быть осуществлен при изучении режима подземных вод, искусственное формирование которых выполнено в сложных гидрогеохимических условиях (четвертая и пятая типовые схемы).

В сложных гидрогеохимических условиях очень важной задачей является изучение возможного продвижения во времена кон-

тура минерализованных вод в плане и в разрезе. Для этого по площади влияния водозабора должны быть размещены так называемые спаренные наблюдательные скважины (рис. 46). В плане их целесообразно размещать по двум взаимно перпендикулярным поперечникам. В этом случае большое значение приобретает стационарное качественное опробование подземных вод методом систематического отбора проб воды для производства химических

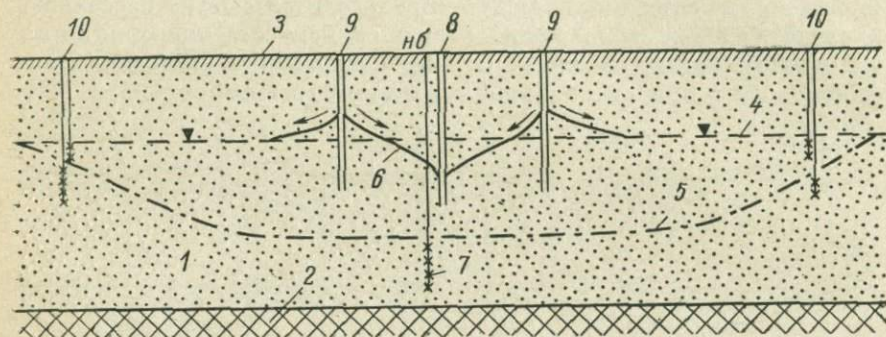


Рис. 46. Схема размещения наблюдательных скважин при эксплуатации искусственно созданной линзы пресных вод.

1 — водопроницаемые породы; 2 — водонепроницаемые породы; 3 — почвенный покров; 4 — уровень подземных вод; 5 — граница раздела пресных и соленых вод; 6 — депрессия; 7 — фильтры скважин; 8 — эксплуатационные скважины для отбора подземных вод; 9 — нагнетательные скважины; 10 — спаренные наблюдательные скважины

и бактериологических анализов и построения различных графиков, характеризующих возможные изменения во времени качественных показателей подземных вод продуктивного горизонта.

Результаты режимных исследований в данных условиях могут позволить своевременно принимать меры к предотвращению возможного внедрения минерализованных вод в продуктивный горизонт и, таким образом, обеспечить при эксплуатации необходимое качество искусственно созданных подземных вод.

Требуется целенаправленное размещение наблюдательных скважин и других наблюдательных постов специально для изучения возможного влияния имеющихся вблизи водозаборных участков очагов искусственного загрязнения подземных и поверхностных вод. С этой целью целесообразно организовать профиль наблюдательных скважин по направлению от возможного очага искусственного загрязнения в сторону действующего водозабора. В этом случае очень важно установить с помощью режимных наблюдений фронт и скорость продвижения контура загрязнений. Эти данные позволят в случае необходимости своевременно предпринять меры по предотвращению возможного загрязнения подземных вод продуктивного горизонта или источника его искусственного питания (см. главу XII).

Опыт показывает, что на некоторых водозаборах по техническим причинам не представляется возможность организовать ре-

жимные наблюдения за уровнем подземных вод непосредственно в эксплуатационных скважинах. В связи с этим целесообразно пробурить в центре и на флангах водозабора в непосредственной близости от эксплуатационных выработок несколько наблюдательных скважин для изучения режима уровней подземных вод.

Для размещения наблюдательной сети в условиях шестой типовой схемы искусственного формирования подземных вод можно использовать ранее изложенные рекомендации.

При изучении режима сравнительно глубоко залегающих напорных вод с искусственным их питанием системой нагнетательных скважин приходится считаться с экономическими соображениями при организации наблюдательной сети. Изучение режима часто производится по минимальной сети и минимальной гидрогеологической информации. В этих условиях важно изучать режим работы нагнетательных скважин (изменение во времени приемистости скважин) и постоянно осуществлять контроль за качеством сырой воды и пластовых вод. В связи с этим целесообразно постоянно проводить систематизацию и анализ собранных материалов по режиму подземных и поверхностных вод.

В процессе проведения стационарных исследований не менее важным является изучение на водозаборном участке условий формирования депрессионной воронки сниженных условий подземных вод. В связи с этим размещение на водозаборном участке наблюдательной сети скважин во всех типовых схемах должно учитывать методические требования построения детальной карты гидроизопъез. Карта должна иметь высокую степень достоверности, так как используются не только для характеристики структуры фильтрационного потока, но и для определения и уточнения гидрогеологических параметров пласта, а также моделирования.

Как показывает опыт, размещение наблюдательной сети скважин для построения карт гидроизогипс (гидроизопъез) в процессе длительной эксплуатации водозаборных сооружений целесообразно проводить в несколько этапов, по мере развития депрессионной воронки и выявления степени сложности структуры фильтрационного потока.

В настоящем разделе не рассмотрены рекомендации по размещению наблюдательной сети с целью изучения режима поверхностных вод — источника искусственного питания пластовых вод. Целесообразно в этом направлении пользоваться методическими рекомендациями, изложенными в официальных руководствах Гидрометслужбы СССР.

НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ РЕЖИМНОЙ СЕТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ ВОДОЗАБОРА

В общую комплексную программу наблюдений за режимом подземных вод на разведочном или эксплуатационном участке целесообразно включить специальный раздел, предусматрива-

ющий систематическое наблюдение за техническим состоянием режимной сети и всех водозаборных сооружений.

Постоянное изучение технического состояния всех видов сооружений на водозаборном участке является очень важным видом исследований, позволяющим правильно и своевременно оценить влияние так называемых технических причин на режим эксплуатации подземных вод.

Как показывает накопленный опыт, технические неполадки отдельных наблюдательных и водозаборных скважин снижают достоверность информации по режиму подземных вод. К ним можно отнести:

а) вышедшие из строя по тем или иным причинам фильтры эксплуатационных и наблюдательных скважин;

б) обрушение стенок или обрыв обсадных колонн скважин, а также пескование, заиливание выработок;

в) неудовлетворительную работу измерительной аппаратуры, непрерывно регистрирующей отдельные элементы режима подземных и поверхностных вод;

г) нарушение по техническим причинам общего технологического режима искусственного питания продуктивного горизонта (технические помехи на инфильтрационных и водоподводящих сооружениях и др.), а также многие другие технические причины.

Все перечисленные выше, а также многие другие технические помехи могут оказывать влияние на формирование отдельных элементов режима подземных вод и несколько исказить общую характеристику режима их эксплуатации. Поэтому систематическое плановое изучение технического состояния всех сооружений на водозаборном участке приобретает большое значение.

В настоящее время разработаны новые специализированные технические средства для диагностики технического состояния и капитального ремонта всех разновидностей скважин — эксплуатационных, разведочных и наблюдательных.

Так, для диагностики скважин с целью изучения технического ее состояния и обнаружения технических неполадок создана автоматическая электронно-каротажная самоходная станция СКВ-69. Этот агрегат, смонтированный на автомашине, позволяет проводить в скважине специальные контрольно-ревизионные исследования для установления причин выхода ее из строя.

Результаты диагностических исследований обычно служат основанием для выбора метода и технологии ремонта скважин. Для производства среднего и капитального ремонта гидрогеологических скважин в нашей стране созданы специальные агрегаты: УРС-1В до глубины 100 м на базе серийного бурового станка УРБ-2А и РА-15В для глубоких скважин (Плотников, 1973).

ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАБОТЫ С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСХОДНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Полевые опытно-фильтрационные работы, которые обычно выполняются с помощью различных опытных откачек, наливов, нагнетаний или режимных наблюдений, составляют наиболее важную часть общего комплекса поисково-разведочных работ на всех стадиях изучения объекта искусственного восполнения подземных вод.

Главное назначение опытно-фильтрационных исследований, как известно, состоит в определении расчетных гидрогеологических параметров водоносных пород и пород, слагающих зону аэрации. Необходимо иметь в виду, что гидрогеологические параметры горных пород являются основой всех применяемых методов оценки эксплуатационных запасов подземных вод, в том числе и с учетом их искусственного восполнения. Следовательно, надежность и достоверность оценки разведанных запасов подземных вод находится в прямой зависимости от достоверности определения расчетных гидрогеологических параметров водоносных пород. Однако этим не исчерпывается значение и важность опытно-фильтрационных исследований.

Гидрогеологические параметры водоносных пород позволяют произвести оценку наиболее рациональных условий эксплуатации подземных вод, инфильтрационных сооружений, а также разработать рекомендации по выбору технологической схемы искусственного питания.

К сожалению, опытно-фильтрационные исследования при разведке подземных вод не всегда проводятся правильно, с соблюдением необходимых требований. Наиболее частые ошибки допускаются при оценке граничных условий фильтрационного потока, поэтому не всегда правильно составляются расчетные схемы; не соблюдаются основные требования методики и техники проведения опытных исследований.

Опытно-фильтрационные исследования горных пород могут выполняться лабораторными и полевыми методами.

В лабораторных условиях фильтрационные исследования проводятся методами физического и математического моделирования. Изучение фильтрационных свойств водопроницаемых пород по

отдельным образцам методами физического моделирования на различных приборах целесообразно проводить преимущественно в поисковую стадию работ на объекте. В эту стадию допускается представить характеристику некоторых гидрогеологических параметров пласта в предварительном виде для ориентировочных оценок.

Решения обратных фильтрационных задач методом математического моделирования на современных АВМ и ЭЦВМ с целью определения гидрогеологических параметров пласта обычно выполняются на объектах со сложными граничными условиями, в завершающую стадию разведки месторождения по данным режимных наблюдений и опытных откачек.

Наиболее ценными и достоверными являются полевые методы изучения гидрогеологических параметров водопроницаемых пород.

Методика проведения опытно-фильтрационных работ в различных природных условиях освещена в литературе достаточно подробно. Поэтому остановимся только на некоторых основных теоретических, методических положениях и технических требованиях, характеризующих постановку опытно-фильтрационных исследований, а также на некоторых деталях, связанных с особенностями проведения полевых опытных работ с целью обоснования искусственного восполнения запасов подземных вод.

Полевые и лабораторные методы фильтрационных исследований в гидрогеологии базируются на общей теории установившегося и неустановившегося движения потока подземных вод в горных породах. Последние в общей теории фильтрации рассматриваются в виде обобщенной сплошной среды, в которой движение подземных вод в естественных и нарушенных условиях описывается уравнениями Дарси, Дюпюи и Тейса. Теоретические представления этих уравнений опираются на основные положения гидравлики и гидромеханики.

Аналитические методы изучения фильтрационных свойств трещиноватых и пористых проницаемых пород базируются на схематизации природных условий и допущении, что рассматриваемый объект имеет относительно однородные гидрогеологические условия.

Наиболее важным этапом проведения опытно-фильтрационных работ является обоснование расчетной фильтрационной схемы изучаемого объекта. Именно при преобразовании природной обстановки в расчетную схему должен быть проявлен наиболее творческий подход. Расчетная схема, правильно отражающая реальную гидрогеологическую обстановку, позволяет повысить достоверность определения исходных параметров пласта.

При проведении опытных откачек из совершенных скважин в безнапорных пластах необходимо учитывать следующие основные факторы, характеризующие структуру возмущенного фильтрационного потока:

а) относительно замедленный характер водоотдачи на площади опыта;

б) изменение мощности пласта при снижениях уровня подземных вод в процессе откачек.

В связи с этим в структуре потока во время проведения опытных откачек можно выделить три периода (Стрельцова, Шестаков, 1967 г.):

I — упруго-гравитационного режима;

II — ложно-стационарного режима;

III — собственно гравитационного режима.

Поэтому для анализа хода опытных исследований целесообразно строить график откачки в координатах $\lg S$ и $\lg t$. Для определения гидрогеологических параметров наиболее достоверно следует пользоваться данными, отвечающими ложно-стационарному режиму уровня, которые могут быть успешно обработаны графо-аналитическим методом.

При определении объемов опытно-фильтрационных работ, размещения опытных и наблюдательных скважин на объекте изучения рекомендуется учитывать следующие факторы:

а) степень сложности геологического (литологического) строения;

б) граничные условия фильтрационного потока в плане и разрезе;

в) степень гидрохимической сложности и гидрогеологической неоднородности.

Комплекс полевых опытно-фильтрационных работ применительно к изысканиям для обоснования искусственного восполнения подземных вод включает следующие основные виды:

а) лабораторные исследования фильтрационных свойств горных пород;

б) опытные наливы в мелкие шурфы;

в) инфильтрационные исследования в опытных бассейнах;

г) опытные нагнетания и наливы в поглощающие скважины;

д) различные виды опытных откачек (пробные и опытные одиночные, кустовые, групповые);

е) комплексные опытно-фильтрационные работы: наливы в бассейны или нагнетание в скважины с одновременным проведением групповой (кустовой) откачки из разведочно-эксплуатационных скважин.

Отдельные виды опытно-фильтрационных работ должны выполняться применительно к стадийности изучения объекта, а также к типовым условиям формирования искусственных запасов подземных вод (см. табл. 1).

Так, например, определения фильтрационных свойств водопроницаемых пород лабораторными методами должны производиться преимущественно в прогнозную или поисковую стадию для приближенной оценки условий искусственного восполнения запасов подземных вод.

Опытные наливывы в мелкие шурфы с целью определения фильтрационных свойств пород зоны аэрации целесообразно проводить в стадию поисков или предварительной разведки применительно к изучению второго, третьего и четвертого типов условий формирования искусственных запасов подземных вод.

Сложный комплекс опытно-фильтрационных работ (пункт «е») рекомендуется проводить в завершающую стадию — детальной разведки или по возможности совмещать его со стадией первой очереди строительства водозаборных сооружений.

Для обоснования искусственного восполнения подземных вод способом напорной фильтрации опытные нагнетания поверхностных вод в продуктивный горизонт, в гидрогеологические скважины проводятся при изучении объектов, отнесенных к четвертому типу (см. табл. 1).

Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод с учетом искусственного восполнения по данным опытно-фильтрационных работ и режимных наблюдений необходимо определять следующие гидрогеологические параметры:

1) коэффициент фильтрации пород, слагающих зону аэрации K ;

2) коэффициент водопроницаемости продуктивного безнапорного или напорного водоносных горизонтов km ;

3) гидравлическое сопротивление донных отложений реки или водоема ΔL ;

4) коэффициент водоотдачи пород продуктивного горизонта (гравитационный μ для безнапорных вод, упругий μ^* для напорных вод) и пород зоны аэрации;

5) значения приемистости нагнетательных скважин $Q_{пр}$;

6) скорость инфильтрации инфильтрационных бассейнов v ;

7) удельная отдача инфильтрационных бассейнов q_6 ;

8) коэффициент фильтрации K_0^1 и объемная масса δ илистого осадка инфильтрационных бассейнов или комплексный фильтрационный параметр K_6 ;

9) коэффициент фильтрационного сопротивления закольматированной зоны инфильтрационного бассейна A_0 .

Все перечисленные расчетные гидрогеологические параметры, используемые для оценки эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением, разделяются на три основные группы:

1) параметры, необходимые для расчета производительности и отдачи инфильтрационных сооружений (инфильтрационных бассейнов и нагнетательных скважин);

2) параметры, используемые для оценки производительности водозаборов с учетом искусственного восполнения запасов подземных вод;

3) параметры, необходимые для прогноза изменения качества подземных вод в процессе искусственного восполнения.

Наиболее перспективным направлением для прогноза работы

инфильтрационных бассейнов открытого типа (бассейнов, каналов) в условиях кольтатации пород и заиления сооружений является использование теоретических зависимостей, основанных на так называемой теории «пленочной» фильтрации воды.

В последнее время рядом исследователей получены расчетные зависимости, позволяющие как прогнозировать во времени скорость инфильтрации, так и оценивать фильтрационные параметры заиленного слоя в донной части бассейна (Бурчак, 1970; Усенко, 1972; Сычев, 1975). В этих работах для прогнозных расчетов инфильтрации из бассейнов используются два основных параметра илистого осадка: объемная масса скелета δ (г/см³) и коэффициент фильтрации K_0^1 (м/сут). Лабораторные определения объемной массы скелета илистого осадка по единичным пробам малого объема не дают достаточно достоверных оценок указанного параметра, значения которого в зависимости от плотности упаковки илистых частиц и содержания песчаных частиц и органических примесей могут изменяться от 0,6 до 1,1 г/см³. Например, при увеличении содержания органических примесей илистый осадок становится более рыхлым и объемный вес его скелета уменьшается, в то же время коэффициент фильтрации возрастает. Раздельная достаточно точная оценка этих параметров, учитывая разные методы и условия их определения, оказалась затруднительной. Поэтому, как показали исследования, применимости теоретических зависимостей для прогнозных расчетов производительности инфильтрационных бассейнов целесообразно определять опытным путем, произведение этих величин в виде комплексного фильтрационного параметра $K_\delta = 10^3 K_0^1$ (в кг/сут на 1 м²).

Помимо этого для оценки продолжительности периода глубоинной кольтатации пород некоторые исследователи используют опытный параметр G (кг/м²) или удельную площадную насыщенность породы илистой и глинистой массой при фильтрации мутной воды. По Т. В. Бурчак (1970) и В. С. Усенко (1972) этот параметр называется грязеемкостью песка и обозначает предельное весовое количество отложившихся в породе илистых и глинистых частиц, приходящееся на единицу фильтрующей поверхности. Предполагается, что после такого насыщения на поверхности песка начинается устойчивое формирование илистого осадка.

ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОД ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПЕРВОГО ТИПА ФОРМИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Для первого типа формирования искусственных запасов подземных вод в условиях эксплуатации береговых инфильтрационных водозаборов коэффициент фильтрации продуктивного водоносного горизонта может быть определен приближенно по данным опытных откачек из одиночных скважин (для поисковой

стадии изучения объекта) и более достоверно из опытной скважины с кустом наблюдательных скважин (для стадии предварительной разведки объекта).

Ввиду небольшой мощности продуктивного водоносного горизонта поисково-разведочные скважины для производства опытно-фильтрационных работ целесообразно бурить совершенного типа, а опытные откачки проводить в условиях установившейся фильтрации. При наличии совершенной гидравлической связи подземных и поверхностных вод стабилизация уровней во время откачки наступает очень быстро. Коэффициент фильтрации водоносных пород при таких условиях следует определять по известной формуле Форхгеймера по данным откачек из скважин, расположенных в зоне влияния реки.

Для оценки степени связи подземных и поверхностных вод, а также оценки эксплуатационных запасов важным параметром является значение гидравлического сопротивления ложка реки или водоема. Характер и степень взаимосвязи подземных вод с поверхностными непосредственно влияет на производительность инфильтрационного берегового водозабора. Процессы заиления и коагуляции русловых отложений реки (водоема) в естественных и нарушенных (при эксплуатации) условиях по существу определяют величину их гидравлического сопротивления. Эти два процесса, переменные во времени, обычно взаимосвязаны и могут быть охарактеризованы в совокупности как дополнительное фильтрационное сопротивление ложка современного русла реки ΔL . Чем меньше значение обобщенного параметра ΔL , тем совершеннее связь подземных и поверхностных вод и тогда можно рассчитывать на подпертый режим фильтрации в процессе эксплуатации водозабора.

При двухслойном строении современной поймы реки наиболее удобным и достоверным способом определения ΔL является метод стационарных наблюдений за режимом уровня подземных вод в естественных условиях. Такие наблюдения целесообразно организовать по скважинам, заложенным в продуктивном горизонте вблизи реки (или водоема) перпендикулярно к современному водотоку. Учитывая, что река играет роль естественной дрены, поперечник наблюдательных скважин должен быть задан по направлению подземного стока.

Для определения гидравлического сопротивления русловых отложений реки можно также воспользоваться данными кустовой откачки, которая (как отмечалось выше) проводится на изучаемом объекте с целью оценки коэффициента фильтрации пород продуктивного горизонта. Значение гидравлического сопротивления ложка реки может быть также найдено по режимным наблюдениям за уровнем воды в реке и уровнем грунтовых вод по одной наблюдательной скважине, расположенной вблизи водотока (Шестаков, 1973).

Расчетные зависимости для оценки параметра ΔL рассмотрены

в ряде опубликованных монографий (Шестаков, 1973; Боровский, Самсонов, Язвин, 1973, и др.) и поэтому в настоящей работе не приводятся.

При однородном строении речных долин гидравлическое сопротивление ложка современного русла можно определить по существу для того, чтобы подтвердить наличие хорошей взаимосвязи поверхностных и подземных вод. Значение обобщающего параметра ΔL в каждом конкретном случае учитывается при расчетах производительности берегового инфильтрационного водозабора путем условного увеличения расстояния между линейным рядом водозаборных скважин и рекой (водоемом).

ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОД ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВТОРОГО И ТРЕТЬЕГО ТИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Для оценки условий формирования искусственных запасов подземных вод, отнесенных ко второму и третьему типам, должны быть предусмотрены следующие основные виды опытно-фильтрационных работ:

- 1) опытные наливывы в мелкие шурфы;
- 2) опытно-фильтрационные исследования в опытных бассейнах;
- 3) комплексные опытно-фильтрационные исследования с одновременной работой групповой откачки и опытными наливками в инфильтрационные бассейны.

Рассмотрим содержание и методику перечисленных выше основных видов опытно-фильтрационных работ.

Опытные наливывы в мелкие шурфы, как известно из практики гидрогеологических работ, обычно проводятся с целью изучения фильтрационных свойств пород, слагающих зону аэрации, и покровных образований. Опытные исследования в этом направлении проводятся главным образом в стадии предварительной разведки изучаемого объекта непосредственно на участках проектируемого восполнения подземных вод.

По результатам опытных наливывов в шурфы определяется коэффициент фильтрации, начальные скорости инфильтрации, а также оценивается в предварительном виде фильтрационная неоднородность покровных образований.

Опытные наливывы в шурфы обычно проводятся:

- а) на выбранной площади возможного размещения будущих инфильтрационных сооружений;
- б) на выбранных участках для периодического или постоянного управляемого площадного затопления территории поверхностными водами с целью искусственного питания действующего или проектируемого водозаборного сооружения.

Шурфовая разведка и опытные наливы в мелкие выработки на участках будущего размещения опытных инфильтрационных бассейнов необходимы для предварительного изучения фильтрационных свойств пород, выбранных в качестве инфильтрационного слоя для искусственного питания продуктивного горизонта. Обычно по результатам опытно-фильтрационных работ составляется сравнительная характеристика водопроницаемых свойств пород продуктивного горизонта. По этим данным производится выбор площадей для строительства опытных инфильтрационных бассейнов для проведения в последующем второго этапа опытно-фильтрационных работ — непосредственно в опытных бассейнах.

Шурфы закладывают по определенной сетке или по поперечникам с различным шагом между выработками; в некоторых случаях целесообразно размещать шурфы по сетке в шахматном порядке. Примерное рекомендуемое количество шурфов четыре-пять на площади одного инфильтрационного бассейна. Выбор глубины заложения разведочных шурфов определяется глубиной залегания продуктивного инфильтрационного слоя; сечение шурфов должно обеспечить размещение полевой установки для опытных работ — инфильтрометра.

Что же касается второго направления шурфовой разведки на участках управляемого затопления поверхностными водами для площадного искусственного питания подземных вод, то в этом случае опытные наливы в шурфы необходимы для оценки фильтрационных свойств покровных образований. Коэффициент фильтрации покровных образований в этом случае является основным параметром для оценки площадного искусственного питания. При этом разведочные шурфы также целесообразно размещать по поперечникам с таким расчетом, чтобы относительно равномерно изучить фильтрационные свойства покровных отложений.

Опытные наливы в шурфы для оценки фильтрационных свойств пород зоны аэрации должны проводиться с использованием известных традиционных методов, основанных на предпосылках об установившемся и не установившемся режиме фильтрации потока — метод Н. С. Нестерова, Н. К. Гиринского и Н. Н. Биндемана. Некоторые дополнения по обработке материалов традиционной методики были разработаны В. В. Бадовым (1971 г.).

Для проведения опытного налива шурф оборудуется одним и двухкольным инфильтрометром диаметром не менее 35 см, устанавливаемым на выровненной площадке зумпфа с вдавливанием металлических колец на глубину до 3 см. Опытный налив ведется при постоянном уровне воды в зумпфе (слой воды 5—15 см), который поддерживается с помощью сосуда Мариотта или мерной емкости с автоматическим регулятором уровня. Замеры расхода воды обычно рекомендуется производить в первые два часа через 10—15 и 20—30 мин, а в последующее время через 30—60 мин. Скорость инфильтрации находится при этом

как отношение зафиксированного расхода воды к площади инфильтрометра. Для оценки режима фильтрационного расхода в шурфе рекомендуется строить график $Q = f(t)$. После окончания опытного налива производится вскрытие пород в зумпфе на глубину до $1,5d$ (где d — диаметр инфильтрометра) с отбором проб и определением влажности пород под площадкой впитывания и на глубине $1-1,5d$. Весьма эффективным является применение при опытах инфильтрометров индикаторного типа.

При оценке результатов опытных наливов необходимо учитывать боковое растекание потока под шурфом, неполное насыщение области фильтрации на глубине предельного растекания ($1-1,5d$), глубину вдавливания кольца инфильтрометра, его диаметр и другие факторы.

При определении коэффициента фильтрации пород зоны аэрации по результатам опытных наливов необходимо учитывать следующее.

В относительно хорошо проницаемых породах — песках, гравии, галечниках — капиллярные силы очень малы; во время опыта вода в них просачивается на сравнительно большую глубину. Исходя из этого, можно допустить, что процесс инфильтрации жидкости происходит в основном под влиянием гидравлического напора. Поэтому при определении коэффициента фильтрации значение капиллярного поднятия можно не учитывать.

В слабо проницаемых породах, обычно слагающих покровные образования, — суглинках, супесях, глинах — значение капиллярного давления при расчетах коэффициента фильтрации необходимо учитывать. Следует отметить, что все применяемые в настоящее время опытные наливывы в шурфы не учитывают особенности фильтрации воды, содержащей взвешенные частицы, поэтому найденные таким образом фильтрационные параметры могут в дальнейшем использоваться лишь для прогноза инфильтрации относительно чистых вод, содержащих незначительное количество взвешенных веществ, или для расчета работы инфильтрационных каналов для искусственного питания при условии, если для них будут приняты такие скорости течения (незаилающие), которые препятствуют отложению ила на дне и стенках канала.

Для обработки данных полевых опытных наливов в шурфы можно воспользоваться методикой, изложенной в монографии «Опытно-фильтрационные работы» (1974 г.).

В соответствии с этой методикой процесс инфильтрации из внутреннего кольца описывается следующим уравнением:

$$vW = A + KW, \quad (\text{VIII.1})$$

где v — скорость инфильтрации во внутреннее кольцо $v = Q_{\text{вн}}/w_{\text{вн}}$;

$Q_{\text{вн}}$ — расход воды на инфильтрацию;

$w_{\text{вн}}$ — площадь поперечного сечения внутреннего кольца ($w_{\text{вн}} =$
 $= (h_k + z_0)$);

$h_k \approx 0,5H_k$;

z_0 — слой воды в кольце;

W — объем воды, просочившейся через внутреннее кольцо (исключая первоначальную заливку слоя воды в кольце);

$A = K\mu_0$;

K — коэффициент фильтрации;

$\mu_0 = \theta_m - \theta_e$ — предельный недостаток насыщения;

θ_m — объемная влажность при полном водонасыщении;

θ_e — естественная объемная влажность породы.

Для обработки данных опытного налива составляется график в координатах $v \cdot W = f(W)$, который должен быть прямолинейным. Тангенс угла наклона прямой к оси W численно равен коэффициенту фильтрации. При пересечении этой прямой с осью $v \cdot W$ отсекается отрезок, равный A , что при известном μ_0 позволяет оценить h_k . Исходная влажность определяется по образцам опережающего бурения с помощью бура (в наружном кольце с последующим тампонажем скважины). После опыта шурф вскрывается и в разрезе глубины промачивания отбираются образцы и монолиты для определения влажности при наливе, объемного веса и пористости среды, что позволяет оценить θ_m и провести перерасчет установленной ранее весовой влажности на объемную.

Отклонение графика $v \cdot W = f(W)$ от прямолинейного свидетельствует о нарушении опытного участка фильтрационной однородности в разрезе покровных образований.

В последнее время в практике гидрогеологических исследований при изыскании под гидротехническое и мелиоративное строительство для изучения фильтрационных параметров горных пород зоны аэрации стал применяться метод нагнетания воздуха. Использование воздуха для изучения пород зоны аэрации основывается на известной в гидродинамике зависимости между коэффициентом фильтрации среды и проницаемостью при фильтрации другого флюида.

Метод нагнетания воздуха в специально оборудованные для этой цели опытные буровые скважины позволяет определить газопроницаемость (воздухопроницаемость) пород и затем по известному уравнению, отражающему закон Дарси, рассчитать коэффициент фильтрации.

При относительно однородных литологических условиях и постоянной ограниченной мощности пород зоны аэрации в процессе проведения опыта с нагнетанием воздуха рекомендуется пробурить одну опытную и одну или две наблюдательные скважины совершенного или несовершенного типа.

В слоистой или неоднородной большой мощности толще пород зоны аэрации опытные работы можно проводить поинтервально, с изоляцией изучаемого интервала тампонирующими приборами.

Таким образом, опытным путем можно изучить эпюру фильтрационных свойств пород.

Преимущество метода определения фильтрационных свойств пород с помощью нагнетания воздуха состоит в том, что не нужна подача воды, а также имеется возможность изучить свойства на всю мощность пород зоны аэрации и выявить их неоднородность. Однако следует отметить, что метод фильтрационных исследований с помощью нагнетания воздуха хотя и является перспективным, но требует дальнейшей доработки и более широкой проверки на практике, в том числе для обоснования искусственного восполнения запасов подземных вод.

Проходит промышленную проверку новый гидрогеотермический экспресс-метод изучения фильтрационных свойств пород зоны аэрации, разработанный во ВСЕГИНГЕО. Этот метод, основанный на изучении скорости перемещения границы раздела сред с различной температурой воды на опытном участке, является довольно простым в исполнении и базируется на использовании недорогой аппаратуры (Н. М. Фролов, 1976 г.).

ПОЛЕВЫЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПЫТНЫХ БАСЕЙНАХ

Опытно-фильтрационные исследования в бассейнах являются одним из основных видов работ на водозаборных участках, где каптажные сооружения проектируются с учетом их искусственного питания системой инфильтрационных бассейнов.

Они проводятся с целью:

а) более достоверного определения опытным путем фильтрационных параметров пород зоны аэрации непосредственно на площади будущих сооружений для искусственного питания, в том числе заиленного слоя, образующегося при фильтрации мутной воды;

б) изучение изменений во времени под влиянием скорости инфильтрации в опытных бассейнах, а также качества исходной воды в процессе инфильтрации;

в) получение исходных данных для рекомендаций по технологии искусственного воспроизводства запасов подземных вод при длительной эксплуатации водозабора.

Эти полевые работы по исполнению являются весьма трудоемкими, они обычно проводятся в стадию детальной разведки объекта и по возможности должны совмещаться во времени со строительством первой очереди водозаборного сооружения. Полевые работы должны быть начаты прежде всего с выбора участков заложения опытных бассейнов.

Место заложения бассейнов выбирается на основе анализа имеющейся по участку геолого-гидрогеологической информации, желательно непосредственно по трассе будущих эксплуатационных бассейнов вблизи действующего водозабора. Если по

санитарным и другим условиям заложение опытного бассейна вблизи действующего водозабора невозможно, то он сооружается на участке, намечаемом под расширение водозабора. Исходя из имеющегося опыта, при проектировании и проведении гидрогеологических исследований рекомендуется следующий примерный выбор расстояния опытного бассейна от водозабора, которое затем корректируется всем комплексом работ: для песков мелкозернистых — 30—50 м, средне- и разнородных — 50—70 м, песчано-гравийно-галечниковых отложений — 100—150 м, для высокопористых валунно-галечниковых пород и трещинно-кар-

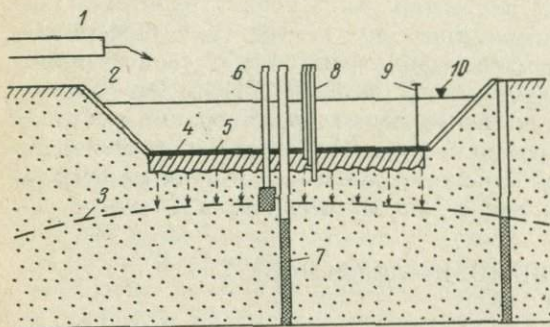


Рис. 47. Схематический разрез опытного инфильтрационного бассейна (по К. И. Сычеву).

1 — подающий воду трубопровод; 2 — откос бассейна; 3 — уровень грунтовых вод; 4 — илистый осадок; 5 — заольтмированный слой песка; 6 — устройство для отбора проб воды под дном бассейна; 7 — наблюдательные скважины; 8 — пьезометры; 9 — мерная рейка (уровнемер); 10 — уровень воды в бассейне

стовых коллекторов при условии применения в бассейнах песчаных загрузок — до 200 м. Примерная площадь дна опытных бассейнов — до 1000 м² и более, глубина — 2—3 м. Конструкция и размеры опытно-эксплуатационных бассейнов могут соответствовать типовым размерам эксплуатационных бассейнов капитального типа.

При обосновании количества и размеров опытных бассейнов следует ориентироваться на степень неоднородности фильтрационных свойств пород зоны аэрации, а также на величину предполагаемой общей площади инфильтрации.

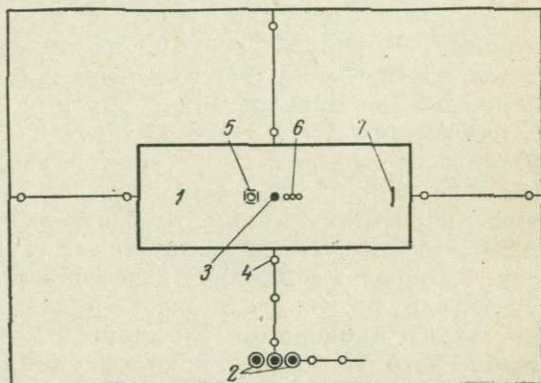
При устройстве опытных бассейнов на трещиноватых, закарстованных породах или крупнопористых валунно-галечниковых отложениях их дно покрывается так называемым фильтрующим слоем отсортированного песка мощностью до 0,5—1 м из местных строительных материалов. В опытных бассейнах, закладываемых на грунтах песчаного состава, слой загрузки можно не предусматривать.

Типовая схема опытного инфильтрационного бассейна изображена на рис. 47. Подача воды в бассейн от источника пополнения (реки, озера, водоема) осуществляется временным трубопроводом. Для аэрации исходной воды при изливе водовыводящая часть трубопровода должна быть несколько приподнята над уровнем воды в бассейне. Инфильтрацию из опытных бассейнов рекомендуется проводить при двух режимах: с относительно постоянной глубиной наполнения 1—2 м или при непрерывном течение

опыта повышении уровня воды с относительно постоянной скоростью инфильтрации. В процессе опыта должны проводиться наблюдения за положением уровня воды в бассейне, за расходом подаваемой воды, ее мутностью, температурой. Потери напора при инфильтрации могут фиксироваться по пьезометрам, устанавливаемым на разной глубине от дна бассейна, обычно для песчано-гравийно-галечниковых отложений не глубже 20—30 см. Для песков, глубинная кольматация которых, как правило, не превышает первых сантиметров, установки пьезометров не требуется.

Рис. 48. Схематический план инфильтрационного бассейна с одновременной откачкой из опытного куста (узла) скважин для определения параметров заиленного слоя и оценки самоочищения воды при инфильтрации.

1 — инфильтрационный бассейн; 2 — опытный узел из трех скважин для откачки; 3 — центральная наблюдательная скважина; 4 — наблюдательные скважины; 5 — устройство для отбора проб воды под дном бассейна; 6 — пьезометры; 7 — рейка для замера уровня воды в бассейне



Оценка степени естественной очистки поверхностной воды в процессе фильтрации производится путем одновременного отбора проб воды на химический и бактериологический анализы из реки, бассейна и подземных вод. В последнем случае пробы могут отбираться из специального устройства под дном бассейна, из наблюдательной скважины, заложенной в центре бассейна, из других наблюдательных скважин, расположенных в створе между бассейном и водозабором (рис. 48). Иногда вместо водозабора может устраиваться опытный куст или опытный узел из двух-трех центральных скважин для откачки с целью определения характера взаимосвязи поверхностных вод в бассейне с подземными и оценки изменений качества воды по пути фильтрации. Пробы воды на химический и бактериологический анализы в начальный период инфильтрации (до 10—15 сут) отбираются через два-три дня, в последующем — раз в 10 дней. Исходя из необходимости достоверной оценки параметров заиленного слоя, минимальная продолжительность опытной инфильтрации, как показывает имеющаяся практика, должна составлять не менее полутора — двух месяцев. Продолжительность инфильтрации в опытно-промышленных бассейнах в сложных условиях и для весьма ответственных объектов водоснабжения может достигать продолжительности полного фильтрационного цикла (6—12 мес).

С целью сокращения времени на проведение опыта и ускорения процесса образования закольматированного слоя при предельном его насыщении глинистыми частицами в ряде случаев рекомендуется подача воды в опытный бассейн с повышенной концентрацией взвешенных частиц (метод «наведенной кольматации»). Переход от процесса глубинной кольматации к поверхностному заилению бассейна с формированием устойчивой илистой пленки фиксируется путем периодического отбора проб донных осадков.

До начала инфильтрации в донной части бассейна по глубине отбираются пробы грунтов на гранулометрический анализ. После окончания опытной инфильтрации и опорожнения бассейна повторяют отбор проб грунта с тех же глубин, а также производят отбор проб илистого осадка для определения объемного веса скелета. Параллельно с опытным наливом для выяснения формирования бугра грунтовых вод и характера их растекания ведутся наблюдения за уровнем в наблюдательных скважинах (см. рис. 48), которые рекомендуется закладывать по двум взаимно перпендикулярным направлениям (четыре луча). Минимальное количество наблюдательных скважин — две-три в одном луче. Первую скважину целесообразно расположить вблизи уреза воды, расстояние второй и третьей наблюдательных скважин уточняется примерными расчетами с использованием параметров водоносного горизонта, принятых по данным предшествующих изысканий или по аналогии. Весь комплекс наблюдения при опытной инфильтрации из бассейна документируется в специальном журнале.

По данным проведенных исследований составляется паспорт опытной инфильтрации из бассейна, в котором дается план бассейна с сетью наблюдательных скважин, продольный и поперечный гидрогеологические разрезы, графики изменения во времени — подаваемого расхода исходной воды, уровня воды в бассейне и наблюдательных скважинах, мутности и температуры воды, отдельных физико-химических и санитарно-бактериологических показателей качества поверхностных и подземных вод (в соответствии с требованиями, изложенными в табл. 5).

В результате опытной инфильтрации определяются параметры заиленного слоя: фильтрационное сопротивление закольматированной зоны A_0 (сут), грязеемкость породы G (кг/м²), комплексный фильтрационный параметр K_0 (кг/сут на 1 м²).

Коэффициент фильтрационного сопротивления закольматированной зоны A_0 в каждый момент глубинной кольматации пород может быть рассчитан по формуле

$$A_0 = \frac{h_0 + m_0}{v}, \quad (\text{VIII.2})$$

где $v = Q/F$ — скорость инфильтрации, определяемая по расходу воды Q , подаваемой в опытный бассейн при постоян-

ной глубине наполнения h_0 и площади инфильтрации F ;
 m_0 — мощность закольматированного слоя.

Наибольшие трудности представляет определение мощности закольматированного слоя m_0 , в пределах которого происходят основные потери напора, а ниже фильтрация приобретает свободный режим. Мощность закольматированного слоя может быть определена непосредственно по изменению плотности пород в вертикальном разрезе зоны аэрации, измеряемой в донной части инфильтрационного бассейна путем просвечивания гамма-лучами (с помощью гамма-плотномера). Определение мощности закольматированного слоя возможно также путем поинтервального отбора и анализа проб грунта на содержание пылеватых и глинистых фракций до инфильтрации и после опорожнения бассейна.

В качестве одного из косвенных методов в ряде случаев для ориентировочной оценки m_0 используются мелкие трубки — пьезометры, устанавливаемые на разной глубине от дна бассейна, по которым фиксируются потери напора при инфильтрации.

Приближенная оценка m_0 возможна также путем ее расчета по изменению скорости инфильтрации на два момента времени при различных глубинах наполнения бассейна h_{01} и h_{02} :

$$v_1 = \frac{h_{01} + m_0}{A_0}, \quad (\text{VIII.3})$$

$$v_2 = \frac{h_{02} + m_0}{A_0}. \quad (\text{VIII.4})$$

При этом изменение глубин наполнения бассейна водой должно происходить достаточно быстро, чтобы величины A_0 и m_0 за рассматриваемый промежуток времени можно было считать практически постоянными. Тогда, решая совместно уравнения (VIII.3) и (VIII.4) относительно A_0 , получим

$$m_0 = \frac{h_{01}v_2 - h_{02}v_1}{v_1 - v_2}. \quad (\text{VIII.5})$$

В тех случаях, когда мощность закольматированной зоны пород несоизмеримо мала (не более 10%) по сравнению с глубиной наполнения бассейна водой, с достаточной для практических целей точностью коэффициент фильтрационного сопротивления заиленного слоя может определяться без учета сопротивления зоны глубинной кольматации пород.

При заданной новой глубине наполнения бассейна водой и известном значении коэффициента фильтрационного сопротивления скорость инфильтрации может быть найдена как отношение двух первых величин.

Параметр грязеемкости пород G используется при оценке продолжительности периода их глубинной кольматации. Грязеемкость рыхлых пород зависит от эффективного диаметра частиц грунта и коэффициента его неоднородности, от высоты напора

или инфильтрации, мощности подаваемой воды и гранулометрического состава взвешенных частиц.

Большой практический интерес представляет установление экспериментальным путем зависимости грязеемкости песков от эффективного диаметра и частиц. Примерный вид кривой, полученной по ограниченному числу опытных данных К. С. Боголюбовым и Т. В. Бурчак, представлен на рис. 49.

Наиболее надежно определение грязеемкости пород производится по данным работы опытных или эксплуатационных инфильтрационных бассейнов. Применимы следующие основные методы:

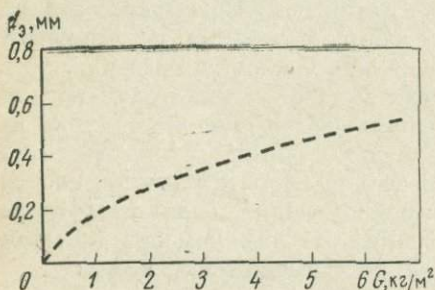


Рис. 49. График зависимости параметра грязеемкости рыхлых грунтов G от эффективного диаметра песчаных частиц d_3 .

а) исходя из общего баланса поступившей в бассейн массы взвешенных в воде частиц

$$G = \frac{QtM}{1000F} - 10^3 m_0 \delta, \quad (\text{VIII.6})$$

где Q — средний расход на инфильтрацию из бассейна, м³/сут;

t — общая продолжительность подачи воды, сут;

M — средняя мутность, мг/л;

F — фильтрующая поверхность бассейна, м²;

m_0 — средняя фактическая толщина илистого осадка, измеренная после опорожнения бассейна для чистки, м;

δ — объемная масса скелета илистого осадка, г/см³;

б) без извлечения пылеватых и глинистых фракций путем взвешивания пробников-цилиндров с песком до и после опытной инфильтрации

$$G = \frac{P_1 - P_0}{f}, \quad (\text{VIII.7})$$

где P_0 и P_1 — соответственно масса пробников-цилиндров с песком, высушенным при температуре 105° С перед установкой в бассейн и после извлечения из бассейна, г или кг;

f — площадь образца песка, м²;

в) путем отмучивания и анализа содержания пылеватой и глинистой фракции в исследуемой песчаной загрузке до и после инфильтрации, с последующим расчетом по формуле, аналогичной (VIII.7).

По этим методам («б» и «в») в донной части бассейнов закладываются специальные кольца, снабженные решеткой и сеткой,

или стаканы с дырчатым дном, заполненные фильтрующим грунтом. Глубина установки до 5—20 см. Отбор образцов песка из донных отложений может также производиться с помощью пробоотборников — грунтоносов перед началом работы бассейна и после его опорожнения.

Количество точек отбора образцов грунта зависит от степени неоднородности пород, заданных точности и надежности определения параметра грязеемкости G . Минимальное количество определений может ограничиваться размером малой выборки (10—15 проб), позволяющей производить статистическую обработку опытных данных для оценки параметров распределения и средних значений. Интересные данные определения грязеемкости (в г/м²) песчаных грунтов получены В. М. Григорьевым, Т. В. Бурчак, В. Н. Лозовым, К. С. Боголюбовым и В. С. Оводовым по некоторым инфильтрационным бассейнам и очистным станциям: Бигашевский водозабор (г. Новокузнецк) 6700, станция Магала (г. Черновицы) 1300—1500, водозабор Балтэзерс (г. Рига) 640, медленные фильтры из мелкозернистых песков 100—300.

Комплексный фильтрационный параметр K рекомендуется определять по данным инфильтрации в опытных бассейнах в зависимости от режима их работы. Для расчета предлагаются следующие теоретические зависимости, описывающие процесс заиления бассейнов в результате непрерывного роста илистого осадка:

а) при режиме работы с постоянной глубиной наполнения бассейна водой

$$K_{\delta} = \frac{2v_t M t}{10^3 h_{\delta}}, \quad (\text{VIII.8})$$

б) при работе бассейна с постоянной скоростью инфильтрации

$$K_{\delta} = \frac{v^2 M t}{10^3 h_{\delta} t}, \quad (\text{VIII.9})$$

в) при сложном режиме работы бассейна для второго периода инфильтрации при $h_{\delta} = \text{const}$

$$K_{\delta} = \frac{2h_{\delta} M (t - t_1)}{10^3 (A_{02}^2 - A_{01}^2)}, \quad (\text{VIII.10})$$

где v_t и $h_{\delta t}$ — изменяющиеся во времени скорость инфильтрации и глубина наполнения бассейна водой;

v и h_{δ} — постоянные в течение фильтроцикла скорость инфильтрации и глубина наполнения;

M — мутность воды, мг/л;

A_{01} и A_{02} — фильтрационные сопротивления соответственно в конце I и II расчетных периодов инфильтрации;

t и t_1 — общая продолжительность инфильтрации и продолжительность I периода.

Остальные обозначения прежние.

Исходя из необходимости достоверной оценки параметров заиленного слоя, минимальная продолжительность опытной инфильтрации для песчаных грунтов должна составлять полтора-два месяца.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА РАБОТЫ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

КОЛЬМАТАЦИЯ ПОРОД В ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Одним из главных вопросов теории фильтрации воды, содержащей взвешенные частицы, при искусственном восполнении запасов подземных вод является прогноз скорости инфильтрации в условиях кольматации и заиления пород. Количественная оценка степени заиления инфильтрационных сооружений позволяет установить закономерности изменения во времени инфильтрационного расхода (отдачи бассейнов просачивания или приемистости поглощающих скважин) в зависимости от мутности подаваемой воды, высоты напора, фильтрационных свойств закольматированного слоя пород и других факторов, а также определить продолжительность периода работы инфильтрационных сооружений от начала восполнения до чистки бассейнов или регенерации скважин для закачки воды. Прогноз изменения скорости инфильтрации и отдачи инфильтрационных сооружений крайне необходим также для оценки эксплуатационных запасов подземных вод в условиях их искусственного восполнения, поскольку при гидродинамических расчетах водозаборов используются значения единичных расходов искусственного восполнения, зависящие от скорости инфильтрации воды.

Кольматация при работе инфильтрационных сооружений представляет собой весьма сложный процесс, достаточно точный прогноз которого является трудно разрешимой задачей. Изучением процесса кольматации грунтов при фильтрации мутных вод из каналов и других гидротехнических сооружений успешно занималась большая группа ученых как в СССР, так и за рубежом. Наиболее подробно в известной литературе освещен процесс механической кольматации.

Е. М. Сергеев (1954 г., 1961), Н. В. Орнатский (1955 г.) и Г. А. Куприна (1965 г.) рассматривают процесс кольматации грунтов как сложное физико-химическое явление, зависящее от минерального состава глинистых частиц, содержания солей в фильтруемых водах и кольматируемых породах. Явления кольматации, происходящие при нагнетании воды в скважины, исследованы еще недостаточно (Фаворин, 1967; Sniegocki, 1963; Bize, 1968; Алексеев и др., 1974 г.).

По данным обобщения экспериментальных исследований, выполненных в полевых и лабораторных условиях, устанавливается зависимость коагуляции пород от содержания в воде взвешенных частиц (коллоидных, глинистых и минеральных), от их гранулометрического и микроагрегатного состава, степени дисперсности, минерального состава глинистой фракции, от размера пор, трещин, пустот или каналов горных пород, содержания водорастворимых солей и состава обменных катионов, от общей минерализации и химического состава воды.

Многообразие факторов, оказывающих решающее значение на коагуляцию пород и сооружений искусственной инфильтрации, позволяет выделить несколько видов процесса коагуляции: механическую, физико-химическую и биологическую. В свою очередь каждый из названных видов имеет свои особенности, связанные с глубиной развития процесса и обуславливающими его причинами.

Механическая коагуляция:

а) глубинная, как процесс смывания глинистых и илистых частиц в поры, трещины и пустоты пород, приводящий к ухудшению их фильтрационных свойств;

б) поверхностная, или заиливание, связанная с образованием илистого осадка на поверхности фильтрующих пород.

Физико-химическая коагуляция:

а) выпадение в осадок различных химических соединений, в основном гидратов окиси железа, марганца, карбонатов и сульфатов кальция;

б) диспергирование и набухание глин в результате ионного обмена, например, разрушение натрием, содержащимся в воде, коллоидных частиц тонкодисперсной фракции грунта;

в) закупорка пор грунтов пузырьками воздуха.

Биологическая коагуляция:

а) зарастание фильтров скважин за счет развития железистых или сульфатредуцирующих бактерий, образование бактериальной и органической слизи;

б) интенсивное развитие в инфильтрационных бассейнах планктона (синезеленых или диатомовых водорослей) вызывает дополнительную коагуляцию фильтрующих пород.

Относительно преобладания того или иного вида коагуляции в процессе искусственного восполнения подземных вод существуют различные мнения. Большинство исследователей считают, что основную роль при восполнении подземных вод способом площадной инфильтрации (бассейнами) и при нагнетании в скважины играет механическая коагуляция пород и фильтров. Однако известны случаи, когда процесс коагуляции был обусловлен другими факторами. Например, при инфильтрации в Соювицах (Чехословакия) основной причиной коагуляции бассейнов в начальный период были микроорганизмы (*Halek, Jedlička, Knežek, Zajíček*, 1970). Водоросли и бактерии, задерживаясь на фильтрующей

поверхности грунта, образуют вязкое покрытие, снижающее расход воды. Для подавления жизнедеятельности бактерий и водорослей вода, особенно нагнетаемая в скважины, предварительно обрабатывается хлором, гипохлоритом или сульфатом меди. Удаление планктона обычно производится механическим путем с помощью микрофильтрации.

Кольматирующее действие в виде закупоривания пор (защелкивания воздуха) оказывает также воздух, захватываемый поступающей в скважину водой и выделяющийся при повышении температуры (если температура закачиваемой воды ниже температуры подземной воды).

Кислород воздуха также активизирует процессы окисления, приводящие к выпадению нерастворимых осадков и способствует биологическому зарастанию фильтров скважин. Характерно, что пузырьки воздуха прочно удерживаются на поверхности и в породе. Опыт нагнетания воды в скважины за рубежом показал, что кольматирующее действие воздуха трудно устраняется (Bize, 1968). Это свидетельствует о том, что в противоположность способам площадной инфильтрации, когда производится дополнительная аэрация воды для насыщения ее кислородом воздуха, при нагнетании в скважины целесообразно проводить деаэрацию воды, не допуская ее свободного падения при подаче в скважину и проявлении турбулентности.

Кольматация поглощающих скважин часто происходит за счет образования гидроокислов железа, причем железа, в основном не привносимого с закачиваемой водой, а находящегося в подземных водах и породах. В подземных водах окислительно-восстановительный потенциал Eh и показатель концентрации водородных ионов pH обеспечивают нахождение железа в растворе в двухвалентной форме. При нагнетании поверхностных вод, обогащенных кислородом воздуха, восстановительные условия в скважине сменяются окислительными и железо осаждается в виде гидроокиси. Развитие железобактерий в присутствии в воде железа способствует образованию на фильтре скважин желатинообразной оболочки, также содержащей гидроокислы железа. Хотя эти бактерии и аэробные, но могут существовать при незначительном содержании кислорода. Разложение их происходит лишь при хлорировании воды. При недостатке кислорода роль кольматирующей субстанции могут играть сульфатредуцирующие бактерии. В ряде случаев существенно кольматирующее влияние оказывают химические продукты жизнедеятельности бактерий (гидроокись и сульфид железа), а также результаты химических реакций инфильтруемой воды с подземной.

Наиболее важным из последних являются разбухание и диспергирование глинистых частиц, приводящие к кольматации фильтрующих грунтов. Эти процессы вызываются обменными реакциями в присутствии в воде иона натрия. По данным

Е. М. Сергеева (1955 г.), переход натрия в обменное состояние создает условия, благоприятные для разрушения вторичных глинистых частиц. Присутствие иона натрия увеличивает толщину пленок связанной воды, которые оказывают расклинивающее влияние на микроагрегаты глинистых грунтов.

Для ликвидации отрицательных явлений при взаимодействии инфильтруемой воды с подземной в ряде случаев рекомендуется создавать в водоносном горизонте и скважине зону — тампон из воды, близкой по своим физико-химическим показателям с подземной. Считается, что использование такого «тампона» из специально обработанной воды, не взаимодействующей с подземной, может предупредить развитие процесса химической кольматации (Vize и др., 1973 г.).

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИРОДНЫХ ВОД

Особенности фильтрации воды, содержащей взвешенные частицы, и динамика развития процесса кольматации определяются литологией пород водоносного горизонта. Характерно, что кольматация пород происходит даже при просачивании вод весьма малой мутности, не превышающей 2—4 мг/л. Исследованиями в полевых и лабораторных условиях выявлен характер развития глубинной кольматации применительно к различным литологическим разностям пород: пескам, гравийно- или валунно-галечниковым отложениям и трещиноватым или закарстованным породам. Для средне-, мелко- и разнозернистых песков кольматация обычно не превышает первых сантиметров, а основное значение имеет поверхностное заиливание. Наоборот, в чистых гравийных и галечниковых породах кольматация может проявляться на нескольких уровнях по глубине, при этом на каждом уровне она имеет прерывистое развитие. Для гравийно-галечниковых и валунно-галечниковых отложений определяющим при развитии глубинной кольматации является гранулометрический состав заполнителя. Глубина зоны кольматации в них, по данным опытных работ, может достигать 1—1,5 м и более. В таких условиях для сохранения естественного фильтра при чистке бассейнов целесообразно снимать лишь илистый осадок, не нарушая зону кольматированных пород, или применять в инфильтрационных бассейнах буферный слой песчаной загрузки.

При фильтрации по крупным трещинам и каналам кольматация в течение некоторого времени может проявляться незначительно за счет рассеивания взвешенных веществ в большом объеме пустотного пространства.

Считается, что фильтрация загрязненных взвешенными веществами вод через песчаные отложения в начальной стадии обычно сопровождается отложением илистых частиц в порах песчаного слоя с образованием закольматированной зоны, а в дальнейшем — накоплением илистого осадка на поверхности песка. Строго

говоря, между двумя этими процессами нет резко выраженной границы. Еще в период развития глубинной кольтматации пород за счет мелкодисперсных фракций взвешенных в воде частиц более крупные частицы оседают на поверхности грунта, формируя илистый осадок. Мощность зоны кольтматации зависит от гранулометрического состава рыхлых грунтов, их грязеемкости, напора подаваемой на инфильтрацию воды, ее мутности и гранулометрического состава взвешенных частиц. При постоянстве создаваемого напора воды глубина проникания кольтматирующей взвеси зависит в основном от размера пор фильтрующего слоя и гранулометрического состава взвешенных частиц. При наличии данных о грязеемкости песка, устанавливаемых экспериментальным путем на фильтрационных приборах или опытных бассейнах, продолжительность периода глубинной кольтматации грунта t_k (сут) определяется приближенно по формуле (Бурчак, 1970)

$$t_k = \frac{G}{v_{cp} M}, \quad (IX.4)$$

где G — грязеемкость пород, $кг/м^2$;

M — мутность воды, поступающей в бассейн, $кг/м^3$ или $мг/л$;

v_{cp} — средняя скорость инфильтрации для данного периода, определяемая опытным путем, $м/сут$.

Скорость просачивания воды из бассейнов определяется в зависимости от развития глубинной кольтматации пород или поверхностного их заиления. Длительные наблюдения и экспериментальные исследования на действующих бассейнах в ГДР показали (Zoffler, Pietsch, Huhn, 1973), что для периода глубинной кольтматации при относительно постоянном наполнении бассейна водой ($h = const$) с достаточной для практических целей точностью изменения скорости инфильтрации могут прогнозироваться по эмпирической формуле

$$v_t = v_0 e^{-\alpha t_k}, \quad (IX.2)$$

где v_0 и v_t — соответственно начальная и переменная скорости инфильтрации, $м/сут$;

t_k — продолжительность глубинной кольтматации, сут;

α — коэффициент уменьшения, скорости инфильтрации, определяемый опытным путем в полевых или лабораторных условиях на два момента времени t_1 и t_2 .

$$\alpha = \frac{\ln v_1 - \ln v_2}{t_1 - t_2}. \quad (IX.3)$$

Постепенный переход от процесса глубинной кольтматации грунтов к их поверхностному заилению происходит при равновесной насыщенности пород глинистыми частицами, при которой размер пор закольтмированного грунта становится меньше размера взвешенных частиц, а действительная скорость движения жидкости (малокоцентрированной суспензии) не превышает ско-

рости свободного падения взвешенных частиц в инфильтрационном бассейне.

Имеющиеся данные по эксплуатации инфильтрационных бассейнов капитального типа показывают, что решающее значение на величину скорости инфильтрации, а следовательно, и отдачу бассейнов с песчаным фильтрующим слоем оказывает образующаяся на их поверхности илистая пленка. Например, по данным Б. Ю. Андерсена (1971 г.), на инфильтрационных бассейнах г. Риги основное сопротивление при фильтрации воды оказывает верхний слой в 10 мм заиленного грунта, т. е. собственно илистый осадок и самый верхний слой закольматированного песка.

По результатам полевых и лабораторных определений при искусственном восполнении подземных вод (Григорьев, 1958; Бурчак, 1970; Дилюнас, 1973 г.; Сычев, Волосевич, 1973 г., 1975 г.) илистая пленка имеет следующие физические свойства: коэффициент фильтрации 0,0003—0,007 м/сут, объемная масса скелета 0,7—0,9 г/см³, объемная масса во влажном состоянии 1,4—1,7 г/см³, влажность 75—90%, удельная масса 2,4—2,7 г/см³, пористость 65—70%, потеря при прокаливании по единичным образцам 9—10%. Следует иметь в виду (Сычев, 1975), что коэффициент фильтрации илистого осадка уменьшается при уменьшении эффективного диаметра фильтрующих грунтов, крупности частиц взвешенных наносов, мутности подаваемой на инфильтрацию воды и содержания в осадке органических остатков (планктона). Объемная масса скелета илистых отложений, наоборот, уменьшается с увеличением содержания органических примесей, так как осадок становится от этого более рыхлым. Согласно указаниям по расчету заиления водохранилищ, при строительном проектировании (1973 г.), при содержании органических веществ 5% объемная масса скелета ила уменьшается на 20—30% по сравнению с осадком, не содержащим органических примесей, и на 30—50% — при весовом их количестве 10%.

АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА СКОРОСТИ ИНФИЛЬТРАЦИИ

На основании опыта эксплуатации ряда инфильтрационных бассейнов установлено, что на долю илистого осадка, отлагающегося на их дне, приходится порядка 90—95% от общего фильтрационного сопротивления при вертикальном движении потока воды. В связи с этим в последние годы рядом исследователей получены расчетные зависимости, позволяющие оценивать изменения во времени скорости инфильтрации от влияния поверхностного заиления и других факторов (Бурчак, 1970; Усенко, 1971; Спрогис, 1971 г.; Минкин, Сычев, 1972; Сычев, 1975; Боголюбов и др., 1974 г.). Вместе с тем анализу применимости этих зависимостей для прогнозных расчетов скорости инфильтрации в известной литературе уделялось еще недостаточное внимание.

Для проверки достоверности прогнозов, выполняемых по теоретическим зависимостям, использованы данные опыта эксплуатации инфильтрационных бассейнов водозабора Балтэзерс (г. Рига) и наблюдения, выполненные по ним в течение 1968—1970 гг. Рижским политехническим институтом (Я. Я. Спрогис, В. Я. Лединьш). Характерные графики режима длительной инфильтрации в течение 155 сут по основному экспериментальному бассейну представлены на рис. 50.

Исследования заключались в теоретическом анализе влияния на скорость инфильтрации сжимаемых свойств илистого осадка, в оценке возможного влияния температуры и вязкости воды по данным фактической инфильтрации в действующих бассейнах; в численном анализе изменений фильтрационных параметров заиленного слоя в процессе длительной инфильтрации и сравнительной оценке применимости теоретических зависимостей для прогноза работы инфильтрационных сооружений путем сопоставления прогнозных и фактических скоростей инфильтрации за период одного фильтроцикла.

Сжимаемость илистого осадка. Как известно, при сжатии илистого осадка пористость его уменьшается и возрастает сопротивление потоку жидкости, что ведет к уменьшению скорости инфильтрации. При этом сжатие слоя осадка происходит как за счет быстрых и медленных высокоэластичных деформаций дисперсной структуры, так и в результате деформаций диффузных слоев (Спрогис, 1971 г.).

Анализ математических моделей процесса фильтрования жидкости с образованием сжимаемого осадка, полученных теоретически и подтвержденных экспериментальными исследованиями А. В. Жужикова (1974), показывает, что удельное фильтрационное сопротивление илистого осадка от перепада давления (напора) в общем подчиняется степенной зависимости

$$\Phi = \Phi_0 + C (\Delta p)^\alpha, \quad (\text{IX.4})$$

где Φ и Φ_0 — удельные фильтрационные сопротивления осадка;

C — постоянная фильтрования;

Δp — перепад давления;

α — степень сжимаемости осадка в долях единицы.

При $\alpha = 1$, т. е. когда осадок считается полностью сжимаемым, уравнение превращается в известную формулу (Спрогис, 1971г), в которой сопротивление илистого осадка прямо пропорционально величине напора

$$\Phi = \Phi_0 + C \Delta p. \quad (\text{IX.5})$$

Я. Я. Спрогис, используя теоретические разработки В. А. Жужикова, провел исследование фильтрационных свойств сжимаемого осадка и закономерностей заиления инфильтрационных бассейнов. Основными факторами, влияющими на фильтрационное сопротивление илистого осадка, по его данным, являются масса

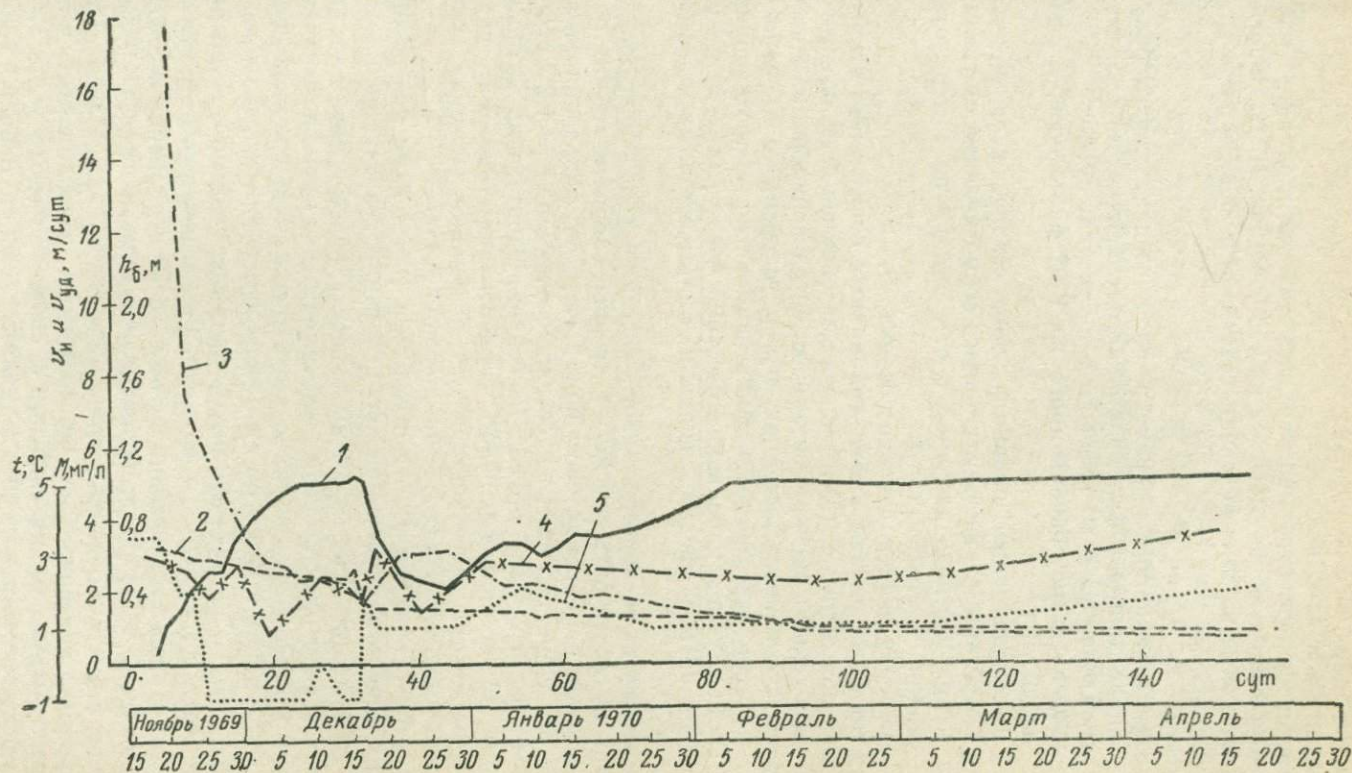


Рис. 50. Графики изменения режима эксплуатации бассейна 17 водозабора Балтзере (г. Рига):
 1 — глубины наполнения бассейна водой h_b ; 2 — скорости инфильтрации v_n ; 3 — удельной скорости инфильтрации (на 1 м глубины наполнения) $v_{уд}$; 4 — мутности воды M ; 5 — температуры воды $t, ^\circ\text{C}$

осадка, накопленного на единицу площади дна бассейна, и перепад давлений в слое осадка.

Для оценки фильтрационного сопротивления единицы площади слоя осадка, образующегося на дне бассейна, Я. Я. Спрогисом была получена эмпирическая зависимость общего вида

$$\Phi = r q_0 + C h_0, \quad (\text{IX.6})$$

где r — фильтрационный параметр слоя осадка, характеризующий прирост фильтрационного сопротивления от накопления на 1 м^2 площади 1 кг осадка, сут/кг;

g_0 — масса осадка, накопленного на 1 м^2 фильтрующей площади, кг;

C — фильтрационный параметр слоя осадка, характеризующий прирост фильтрационного сопротивления от увеличения перепада давлений в слое осадка на 1 м высоты водяного столба, сут/м;

h_0 — перепад давлений в слое осадка, м.

Для прогноза работы инфильтрационных сооружений открытого типа по формуле (IX.6) с учетом сжимаемости илистого осадка необходимо экспериментальное определение на опытных или эксплуатационных бассейнах, путем ускоренного их наполнения, зависимости прироста фильтрационного сопротивления от прироста глубины наполнения бассейна $\Delta\Phi = f(\Delta h_0)$ и количественная оценка средних величин фильтрационных параметров r и C .

По одному из экспериментальных бассейнов водозабора Балтазерс при мутности воды $4,5 \text{ мг/л}$ и средней скорости инфильтрации в период наполнения бассейнов $2,74 \text{ м/сут}$, фильтрационные параметры слоя сжимаемого осадка составили $r = 1,2 \text{ сут/кг}$ и $C = 0,33 \text{ сут/м}$. Для других бассейнов, работающих в иных условиях (мутность воды, напор, скорость инфильтрации), указанные параметры могут принимать различные значения, что требует их оценки в каждом конкретном случае.

На основе решений В. А. Жужикова (1971) нами построены графики (рис. 51), показывающие изменения безразмерной скорости фильтрации \bar{v} от величины относительного времени $\bar{\tau}$ при различных значениях степени сжимаемости α . С использованием указанных графиков определялось отклонение безразмерной скорости фильтрации в широком диапазоне изменений безразмерного времени $\bar{\tau} = 1-50$ при принятых крайних значениях степени сжимаемости осадка $\alpha = 0$ и $\alpha = 0,9$. Результаты расчетов показали, что в пределах колебаний $\bar{\tau}$ от 1 до 50 отклонение σ изменяется от 14 до 26%, при этом наибольшие отклонения (21—26%) получены при $\bar{\tau} < 3$. Среднее отклонение безразмерных скоростей фильтрации, найденное по эмпирическим зависимостям, при заданных выше пределах значений α составило около 18%. Так как существенные изменения величины давления (напора) воды

обычно наблюдаются сравнительно непродолжительное время в начальный и конечный период инфильтрация, при наполнении и опорожнении бассейнов, то прогноз отдачи инфильтрационных сооружений в условиях свободной инфильтрации воды с достаточной для практических целей точностью может производиться без учета сжимаемости илистого осадка. Это положение по существу было подтверждено расчетами инфильтрации из бассейнов Балтэзера, сделанными исходя из теоретических зависимостей, не учитывающих сжимаемые свойства илистого осадка.

Изменения фильтрационных свойств илистой пленки в результате ее уплотнения в известной мере могут учитываться при опре-

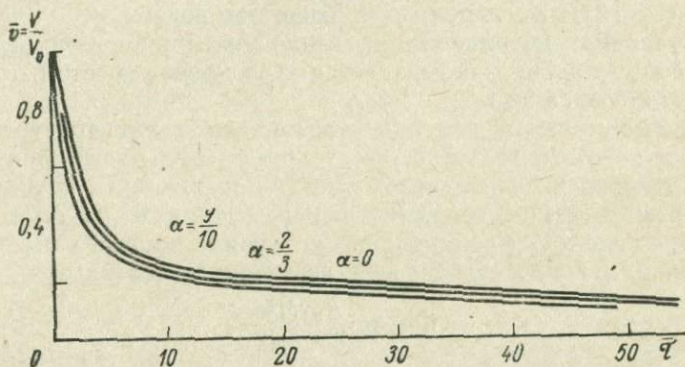


Рис. 51. Графики изменения относительной скорости инфильтрации \bar{v} от относительного времени τ при различных значениях степени сжимаемости осадка α

делении ее проницаемости через некоторое время от начала инфильтрации, когда произойдет относительная стабилизация уровня воды в бассейне или колебания его будут незначительными.

В аналитических решениях для оценки скорости инфильтрации также может не учитываться изменение давления воздуха под дном инфильтрационных бассейнов. Экспериментальными и натурными исследованиями, выполненными В. Я. Лединьшем (1973 г.), доказано, что влияние этого фактора практически не сказывается на процессе инфильтрации при глубине уровня грунтовых вод под дном бассейна более 1,2 м. В подавляющем большинстве случаев при эксплуатации водозаборов и систем инфильтрационных бассейнов это условие будет соблюдаться, поэтому давление на поверхность грунтовых вод может приниматься равным атмосферному.

Уравнения «пленочной» фильтрации для различных режимов искусственного восполнения подземных вод. Рассмотрим основные расчетные зависимости для прогноза скорости инфильтрации в условиях поверхностного заиления инфильтрационных бассейнов.

Фильтрация из таких бассейнов происходит с неполным заполнением пор грунта или в виде дождевания. В этом случае, как показано В. М. Шестаковым (1965 г.), при давлении на поверхность грунтовых вод, равном атмосферному, положение уровня грунтовых вод не влияет на просачивание из водоема (бассейна) и скорость инфильтрации выражается формулой

$$v = K_0 \frac{h_0 + m_0}{m_0} = \frac{h_0 + m_0}{A_0}, \quad (\text{IX.7})$$

где $A_0 = m_0/K_0$ — коэффициент сопротивления заиленного слоя фильтрации, равный отношению мощности этого слоя m_0 (м) к его коэффициенту фильтрации K_0 (м/сут); h_0 — глубина наполнения бассейна водой, м.

В условиях поверхностного заиления величина фильтрационного сопротивления определяется в основном ростом толщины илистого осадка m_0 .

Учитывая изменения при инфильтрации температуры воды, а также то обстоятельство, что толщина заиленного слоя грунта обычно бывает несоизмеримо малой по сравнению с глубиной наполнения бассейна водой на основе формулы (IX.7) получим в общем виде дифференциальное уравнение процесса «пленочной» фильтрации воды, содержащей взвешенные частицы

$$dm_n = \frac{K_n \gamma M h_0}{10^6 \delta m_n \mu} dt, \quad (\text{IX.8})$$

где dm_n — элементарное приращение толщины илистого осадка, м;

K_n — коэффициент проницаемости илистого осадка, Д;

γ — удельная масса воды, которая для пресных вод различной температуры может быть принята равной 1 г/см³;

μ — вязкость воды, зависящая в основном от ее температуры, в сПз;

dt — приращение времени инфильтрации;

M — мутность воды, мг/л;

δ — объемная масса скелета илистого осадка, г/см³.

При решении дифференциального уравнения «пленочной» фильтрации воды применительно к трем основным типам режима работы инфильтрационных бассейнов получим следующие расчетные зависимости:

при постоянной глубине наполнения водой

$$v_t = \frac{v_{0к}}{\sqrt{1 + \frac{h_0 M \mu (t - t_1)}{10^6 K_n \delta \gamma A_{01}}}}, \quad (\text{IX.9})$$

при постоянной скорости инфильтрации

$$h_0 t = A_{01} v + \frac{v^2 M \mu (t - t_1)}{10^6 K_n \delta \gamma}, \quad (\text{IX.10})$$

при опорожнении бассейна после прекращения подачи воды

$$v_t = v_k e^{-A_{ок}^{-1} t}, \quad h_{6t} = h_{60} e^{-A_{ок}^{-1} t}. \quad (IX.11)$$

Время, в течение которого вода практически вся профильтруется из бассейна, составит

$$t = A_{ок} \ln \frac{h_{60}}{h_{6t}}, \quad \text{или} \quad t = A_{ок} \ln \frac{v_k}{v_t}. \quad (IX.12)$$

Здесь t_1 — продолжительность периода глубинной кольтации пород, сут;

$v_{ок}$ — скорость инфильтрации в конце периода глубинной кольтации, м/сут;

A_{01} — фильтрационное сопротивление закольтативированной зоны пород, сут;

v_k и $A_{ок}$ — конечные скорость инфильтрации и фильтрационное сопротивление на момент прекращения подачи воды в бассейн;

h_{6t} и v_t — изменяющиеся во времени глубина наполнения водой и скорость инфильтрации при опорожнении бассейна.

Например, если $A_{ок} = 2$ сут, $v_k = 0,5$ м/сут и $v_t = 0,005$ м/сут, то $t = 2,33 \lg \frac{0,5}{0,005} = 9,2$ сут.

Указанные теоретические формулы в наиболее полном виде описывают процесс «пленочной» фильтрации с учетом фильтрационного сопротивления закольтативированной зоны пород A_{01} и изменений вязкости воды, так как она зачастую имеет немаловажное значение, при каких начальных фильтрационных свойствах пород протекает инфильтрация и как отражаются количественно на этот процесс колебания температуры подаваемой на инфильтрацию воды.

Следует отметить, что если в формуле (IX.9) заменить выражение $h_6 M \mu / 10^6 K_p \delta \gamma A_{01}$ через (K) , то получается приближенная формула, используемая для прогнозных расчетов заиления инфильтрационных бассейнов в Западной Европе (Löffler, Pietsch, Huhn, 1973):

$$v_t = \frac{v_{ок}}{\sqrt{1 + (K) t_3}}, \quad (IX.13)$$

где t_3 — продолжительность поверхностного заиления бассейнов, сут;

(K) — эмпирически определяемая постоянная в период поверхностного заиления бассейна или на мембранном фильтре, сут⁻¹.

Величина параметра (K) может быть найдена на конец опыта из формулы (IX.13)

$$(K) = \frac{v_{ок}^2 - v_t^2}{v_t^2 t_3}. \quad (IX.14)$$

Анализ возможного влияния различных факторов на значение обобщенного параметра (K) показывает, что величина его может считаться относительно постоянной и приниматься по аналогии для других намечаемых бассейнов лишь при условии, если будут одинаковыми глубина наполнения бассейнов h_0 , мутность воды M , ее температура, влияющая на вязкость μ , и фильтрационное сопротивление закольматированной зоны грунта A_0 , т. е. практически должны быть близкими литология и фильтрационные свойства пород зоны просачивания действующего бассейна и проектируемого аналога.

По данным экспериментальных исследований на фильтрационных колоннах, наблюдений на опытных и действующих инфильтрационных бассейнах (Бурчак, 1970 г.; Андерсон, 1971 г.; Спрогис, 1971 г., и др.), мощность закольматированной зоны для песчаных грунтов обычно ограничивается первыми сантиметрами, что несоизмеримо мало по сравнению с высотой напора воды в бассейне h_0 . При ошибке определения A_{01} не более 10% из формулы (IX.9) найдем, что при глубине наполнения бассейнов водой 1—2 м максимальная мощность закольматированной зоны пород, при которой фильтрацию мутной воды допустимо принимать без учета величины A_{01} , может достигать 0,1—0,2 м. Это условие практически соблюдается для всех разностей песков и гравийно-песчаных отложений, поэтому при сооружении инфильтрационных бассейнов на таких породах или при устройстве на дне слоя песчаной загрузки фильтрация воды с начала искусственного восполнения может условно рассматриваться как «плечная». При этом фильтрационное сопротивление закольматированного слоя пород учитывается интегрально в общем сопротивлении илистого осадка.

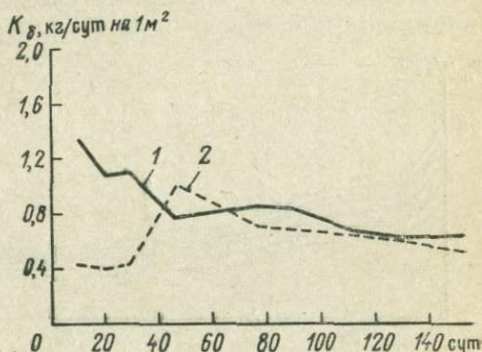
Температура воды. Анализ зависимости (IX.9) показывает, что при режиме фильтрации с постоянной глубиной наполнения бассейна скорость инфильтрации не прямо пропорциональна вязкости воды. При максимальной амплитуде колебаний температуры поверхностной воды от 0 до 25° С предел возможных колебаний скорости инфильтрации достигает 42%. В период опытных работ в диапазоне наиболее вероятных изменений температуры воды от 5 до 10° С, от 10 до 15° С и от 15 до 20° С отклонения скоростей инфильтрации составляют 7—9%, чем в ряде случаев для прогнозных расчетов можно пренебречь.

В процессе инфильтрации в экспериментальном бассейне водозабора Балтэзерс с 14 ноября 1969 г. по 21 апреля 1970 г. температура воды изменялась в пределах от -1° С до +3° С. Этим температурам соответствуют значения коэффициентов динамической (абсолютной) вязкости воды 1,84 и 1,58 сПз. Крайний предел отклонений скорости инфильтрации от влияния этого фактора равен 8%. В течение второго опыта в данном бассейне с 14 июля по 21 августа 1969 г. колебания температуры воды составили 3° С, т. е. от +17 до +20° С, что привело к изменению

коэффициента динамической вязкости от 1,08 до 1,002 сПз. Такое изменение вязкости воды дает максимальное отклонение скорости инфильтрации около 4%.

Таким образом, при обработке и интерпретации экспериментальных исследований на действующих бассейнах Балтэзерс влияние изменений температуры и вязкости воды на процесс инфильтрации будет сказываться незначительно, что позволяет не учитывать этот фактор при определении фильтрационных параметров заиления.

Рис. 52. Графики изменения во времени (t) комплексного фильтрационного параметра K_{δ} по бассейну водозабора Балтэзерс при расчетах для двух режимов инфильтрации:
1 — при $h_0 = \text{const}$; 2 — при $v_0 = \text{const}$



Параметры илистого осадка. Для прогнозных расчетов на стадии гидрогеологического обоснования искусственного восполнения запасов подземных вод предлагается определять опытным путем комплексный фильтрационный параметр заиленного слоя K_{δ} (кг/сут на 1 м²), представляющий собой произведение коэффициента фильтрации илистого осадка на объемную массу его скелета.

Методика оценки комплексного фильтрационного параметра K изложена в главе VIII. Расчеты этого параметра производились для основных режимов инфильтрации: при постоянной (усредненной) глубине наполнения бассейна водой и при постоянной (усредненной) скорости инфильтрации. Результаты поэтапного расчета этих параметров при разной продолжительности эксперимента от начала инфильтрации нанесены на графики, представленные на рис. 52. Анализ указанных графиков и сравнение с режимом уровней, температуры и мутности воды во время опыта (см. рис. 50) свидетельствуют, что характер изменения параметра K_{δ} при расчете по первой схеме ($h = h_{cp} = \text{const}$) больше соответствует физической картине фильтрации, чем при второй схеме расчета ($v = v_{cp} = \text{const}$). В начальный период, когда наблюдался подъем уровня воды в бассейне и происходила глубинная кольтатация песка, его проницаемость непрерывно уменьшалась (K_{δ} снизился с 1,32 до 0,75 кг/сут на 1 м²). В интервале времени от 46 до 90 сут инфильтрационные свойства осадка

изменялись незначительно с возрастанием K_{δ} на 7—13%. Причиной этого могло быть как разуплотнение осадка в целом из-за более низкого напора воды по сравнению с первым периодом, так и повышение температуры воды, а следовательно, уменьшение ее вязкости, что вызвало некоторое улучшение просачивания воды. Последующий подъем уровня и стабилизация напора воды в бассейне снова привели к уплотнению осадка и некоторому уменьшению K_{δ} . В течение последних полутора месяцев фильтрационные свойства илистого осадка сохранялись относительно постоянными ($K_{\delta} = 0,62—0,66$ кг/сут на 1 м^2). Таким образом, после полутрамесячной инфильтрации в течение последующих

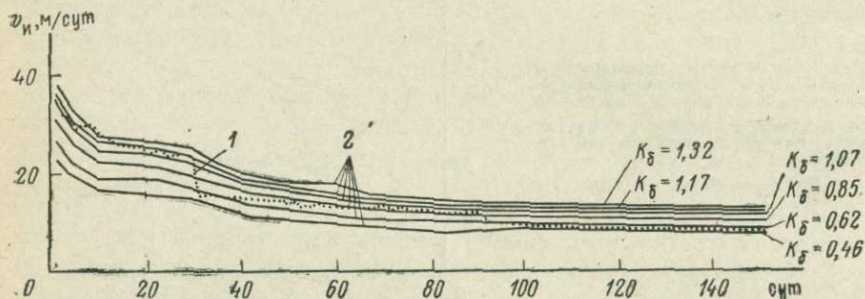


Рис. 53. Графики скорости инфильтрации по бассейну водозабора Балтзасер: 1 — фактический; 2 — прогнозные с использованием различных опытных значений комплексного фильтрационного параметра K_{δ}

110 сут максимальное отклонение комплексного фильтрационного параметра от среднего значения за этот период не превышало 15—16%, что свидетельствует в целом о достаточно устойчивых во времени фильтрационных свойствах илистой пленки.

Вторым этапом исследования являлся анализ сходимости средних фактических и расчетных скоростей инфильтрации за период наблюдений (рис. 53; табл. 7). Последние определялись для режима инфильтрации при $h_{\text{ср}} = \text{const}$ и при соответствующих этому режиму параметрах K_{δ} , полученных на семь моментов времени через 10, 28, 46, 59, 76, 112 и 152 сут от начала периода инфильтрации. По второму, более кратковременному опыту проверялось условие сходимости скоростей по параметрам, найденным по данным инфильтрации через 10, 20, 30 и 35 сут от начала опыта. Наименьший процент отклонения от фактических скоростей имеют прогнозные расчеты, выполненные с использованием параметра K_{δ} , найденного через 1,5—2 месяца от начала инфильтрации по первому эксперименту (1—2%) и через 20 сут по второму (1%).

Проведенные исследования показали возможность применения упрощенных аналитических зависимостей, основанных на уравнении «пленочной» фильтрации, для прогноза инфильтрационных сооружений, закладываемых в песчаных отложениях

Анализ сходимости и фактических скоростей инфильтрации
для условия $h = \text{const}$

Продолжительность опыта, сут	Коэффициент фильтрации илистой пленки при $\delta = 0,75$ г/см ² , м/сут	Комплексный фильтрационный параметр K_{δ} кг/сут на 1 м ²	Средняя за фильтроцикл скорость инфильтрации v_n , м/сут		Отклонение от фактической скорости, %
			фактическая	расчетная	
Бассейн 17 (с 14/XI 1969 г. по 21/IV 1970 г.)					
10	0,00176	1,32	1,41	1,82	+29
28	0,00145	1,09	1,41	1,58	+12
46	0,00100	0,75	1,41	1,38	-2
49	0,00107	0,80	1,41	1,42	+1
76	0,00113	0,85	1,41	1,44	+2
112	0,00088	0,66	1,41	1,28	-9
152	0,00083	0,62	1,41	1,24	-12
Бассейн 17 (с 14/VII по 31/VIII 1969 г.)					
10		1,17	1,41	1,69	+20
20		0,78	1,41	1,40	-1
30		0,46	1,41	1,17	-17
35		0,46	1,41	1,17	-17

или имеющих песчаную загрузку. С использованием факторно-диапазонного анализа установлены пределы возможного влияния на процесс инфильтрации сжимаемых свойств илистого осадка, изменений температуры, воды, ее вязкости и начального фильтрационного сопротивления закольматированного слоя грунта. При расчетах инфильтрационных сооружений открытого типа целесообразно использование комплексного фильтрационного параметра K_{δ} , что позволяет исключить массовые лабораторные определения объемной массы скелета илистого осадка, достоверность оценки которой представляется сомнительной, учитывая точечное опробование и изменчивость ее по площади и в процессе инфильтрации. Тем самым может быть повышена эффективность исследований по обоснованию искусственного восполнения запасов подземных вод с помощью инфильтрационных бассейнов.

При искусственном восполнении грунтовых вод в песчаных отложениях для достоверной оценки комплексного параметра заиления K_{δ} , обеспечивающей достаточно высокую степень сходимости прогнозов с фактическим режимом работы бассейнов, продолжительность опытно-инфильтрационных исследований должна составлять не менее полутора — двух месяцев.

РАСЧЕТЫ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПОЛНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Расчеты систем искусственного восполнения подземных вод рассматриваются применительно к двум основным видам инфиль-

трационных сооружений капитального типа — бассейнам просачивания и поглощающим скважинам.

Расчет инфильтрационных бассейнов сводится к определению их производительности Q_n , общей площади инфильтрации F , основных размеров и числа бассейнов.

Необходимая производительность инфильтрационных сооружений (бассейнов) определяется из выражения

$$Q_n = \frac{Q_n - Q_{в. е}}{\alpha} = \frac{Q_{в. и}}{\alpha}, \quad (\text{IX.15})$$

где Q_n — требуемый дебит водозабора с учетом искусственного восполнения подземных вод, м³/сут;

$Q_{в. е}$ — часть дебита водозабора, обеспеченная за счет естественных подземных вод, м³/сут;

$Q_{в. и}$ — часть дебита водозабора, формируемая за счет искусственного восполнения, м³/сут;

α — коэффициент полезного действия системы искусственного восполнения или привлекаемая к водозабору часть расхода на инфильтрацию из бассейнов.

Коэффициент α зависит от параметра водоносного горизонта, его граничных условий, конструкции водозабора и от продолжительности непрерывной инфильтрации.

При известных значениях производительности инфильтрационных бассейнов Q_n (м³/сут) и средней скорости инфильтрации $v_{ср}$ (м/сут) необходимая площадь инфильтрации F (м²) определяется по формуле

$$F = \frac{Q_n}{v_{ср}} = \frac{2lq_6}{v_{ср}}, \quad (\text{IX.16})$$

где q_6 — единичный расход на инфильтрацию из бассейнов (м³/сут) на 1 м длины водозабора;

$2l = \sigma \cdot N$ — длина водозаборного ряда (м) при количестве скважин N и расстоянии между ними σ .

Величина фильтрующей поверхности F зависит от типа проектируемых инфильтрационных бассейнов. Для бассейнов капитального типа, откосы которых облицовываются плитами, она определяется площадью дна.

Для бассейнов облегченного типа с незакрепленными откосами, сложенными водопроницаемыми породами, площадь инфильтрации принимается с учетом фильтрационных откосов, смоченная поверхность которых умножается на коэффициент 0,67 (Бурчак, 1970).

Средняя скорость инфильтрации может приниматься по аналогии с действующими в сходных гидрогеологических и других условиях бассейнами; по данным работы опытного бассейна непосредственно на проектируемом участке, если продолжительность его работы составляет не менее одного полного фильтрационного цикла.

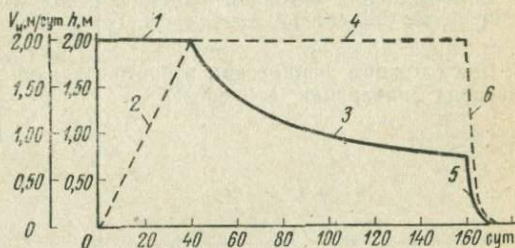
При отсутствии указанных данных величина средней скорости может быть получена приближенно путем расчета по аналитическим зависимостям с использованием фильтрационных параметров, найденных при более кратковременных наблюдениях (до 1—2 мес) в специальных опытных бассейнах или на фильтрационных колоннах.

В большинстве случаев эксплуатация бассейнов происходит в сложном режиме, включающем в себя три основных периода (рис. 54):

1) при наполнении бассейна инфильтрация идет с относительно постоянной скоростью при непрерывном повышении уровня воды

Рис. 54. Графики изменения во времени скорости инфильтрации и глубины наполнения бассейна водой при сложном режиме его эксплуатации.

I период: 1 — $v = \text{const}$, 2 — $h = f(t)$; II период: 3 — $v = f(t)$, 4 — $h = \text{const}$; III период: 5 — $v = f(t)$, 6 — $h = f(t)$



в бассейне, достигающем в конце периода максимально допустимой величины h_{max} ;

2) после достижения максимального уровня воды h_{max} бассейн работает с постоянным напором при уменьшающейся скорости инфильтрации;

3) после прекращения подачи воды в бассейн, при его опорожнении происходит уменьшение как глубины воды, так и скорости инфильтрации.

Основные расчетные зависимости для определения скорости просачивания в условиях «пленочной» фильтрации представлены в табл. 8.

Мутность воды при прогнозных расчетах по указанным формулам принимается в соответствии с данными о средней естественной мутности источника восполнения (озера, водохранилища, канала) за период фильтрацикла, но не более 20 мг/л. При мутности, превышающей в отдельные периоды указанную величину, должны рекомендоваться мероприятия по предварительному уменьшению мутности путем фильтрования на скорых фильтрах, отстаивания в специальных отстойных бассейнах или временного прекращения подачи воды в бассейны.

Если техническими условиями предварительная очистка или отстаивание воды до определенных норм мутности не предусматриваются, то используются данные изучения режима естественной мутности источника восполнения. В этом случае прогнозные расчеты выполняются для каждого периода с относительно постоянной (усредненной) мутностью воды.

**Рекомендуемые упрощенные зависимости для прогноза
работы инфильтрационных бассейнов при условии просачивания
через растущий илистый осадок**

Режим искусственного восполнения	Формулы для расчета режима работы бассейнов
С постоянной скоростью инфильтрации ($v = \text{const}$)	$t_1 = \frac{10^3 K_\delta h_{\max}}{v^2 M} \quad (\text{IX.17})$
С постоянной глубиной наполнения водой ($h = \text{const}$)	$v_t = \sqrt{\frac{10^3 h_0 K_\delta}{2 M t}} \quad (\text{IX.18})$
При сложном режиме для второго периода фильтрации ($h_c = \text{const}$)	$v_t = \frac{v_0}{\sqrt{\frac{1 + 2h_c M (t - t_1)}{10^3 K_\delta A_0}}} \quad (\text{IX.19})$
	$A_0 t \approx \frac{h_t}{v_t} \quad (\text{IX.20})$

При расчетах для первого периода, т. е. когда в бассейн подается один и тот же расход воды, определяется время, за которое глубина наполнения достигнет максимально допустимой высоты.

Для оценки скорости инфильтрации в течение второго периода задаются определенными промежутками времени от его начала, например, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 сут и т. д. и по формуле (IX.19) рассчитывают на каждый момент времени соответствующую ему скорость инфильтрации. Затем строится график зависимости $v = f(t)$, по которому находится средняя скорость за весь второй период. Предварительно на конец первого периода определяется фильтрационное сопротивление заиленного слоя A_0 как отношение глубины наполнения водой h_c к скорости инфильтрации на конец этого периода v_1 .

Для режима сработки уровня воды в бассейне при его опорожнении (третий период) определение изменяющихся во времени скорости инфильтрации и глубины наполнения бассейна водой следует производить по формулам (IX.11). Для этого задаются короткими отрезками времени (1—2 сут), а затем по расчетным точкам строятся графики $v = f(t)$ и $h = f(t)$, по которым определяется средняя за данный период скорость инфильтрации.

Средняя за весь фильтроцикл скорость инфильтрации из бассейнов $v_{\text{ср}}$ определяется с использованием полученных значений для каждого периода инфильтрации

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_1 t_1 + v_2 t_2 + v_3 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}, \quad (\text{IX.21})$$

где v_1, v_2, v_3 — средние скорости инфильтрации в течение первого, второго и третьего периодов при соответствующей им продолжительности t_1, t_2, t_3 .

Среднюю годовую скорость инфильтрации находят по формуле

$$v_r = \frac{\sum v_i t_i}{365}. \quad (\text{IX.22})$$

Размеры инфильтрационных бассейнов в плане определяются исходя из условия размещения их вдоль водозаборных скважин и удобства эксплуатации. Длину отдельных бассейнов l_6 рекомендуется принимать в пределах 100—400 м при расстоянии между бассейнами не менее 20 м. При известной общей площади инфильтрации F и принятой длине бассейнов l_6 средняя ширина бассейнов b_6 определяется из выражения

$$b_6 = \frac{F}{\sum l_6}. \quad (\text{IX.23})$$

Минимальная ширина бассейнов по дну должна быть не менее 5 м (обеспечивать свободный проезд механизмов для чистки). Высота слоя воды в бассейне должна приниматься в пределах 1—3 м, исходя из условий поддержания расчетной скорости инфильтрации, а также исключения опасности промерзания воды в зимнее время. Требуемое количество бассейнов определяется принятыми их размерами и общей площадью инфильтрации. Общая отдача воды инфильтрационными бассейнами в водоносный горизонт W (м^3) при продолжительности фильтроцикла t_ϕ (сут) определяется по формуле

$$W = Q_n t_\phi = F \sum v_i t_i. \quad (\text{IX.24})$$

При гидрогеологическом обосновании работы инфильтрационных бассейнов часто требуется оценить возможную продолжительность одного фильтроцикла, т. е. частоту регенерации фильтрующих грунтов, их очистку от ила и удаление при необходимости слабопроницаемого закольматированного слоя.

В общем случае продолжительность одного фильтроцикла должна составить

$$t_\phi = t_k + t_3, \quad (\text{IX.25})$$

где t_k — продолжительность глубинной кольматации, определяемая с использованием данных о грязеемкости грунта по формуле (IX.1);

t_3 — максимально допустимая продолжительность поверхностного заиления бассейна.

Величина t_3 может быть найдена путем решения уравнения (IX.19) относительно времени эксплуатации бассейна при заданной конечной допустимой скорости инфильтрации $v_{\text{доп}}$

$$t_3 = \frac{10^3 K_\delta A_0}{2hM} \left(\frac{v_0^2}{v_{\text{доп}}^2} - 1 \right). \quad (\text{IX.26})$$

В качестве допустимой конечной скорости инфильтрации могут приниматься значения менее 0,2—0,3 м/сут. Для бассейнов со сформировавшейся зоной кольтации (после первой очистки дна от наилка) продолжительность фильтроцикла будет соответствовать максимальной длительности периода поверхностного заиления ($t_\phi = t_3$).

ПРИМЕР ПРОГНОЗНОГО РАСЧЕТА СКОРОСТИ ИНФИЛЬТРАЦИИ

В качестве примера рассмотрена методика обоснования средней скорости инфильтрации воды из бассейна при сложном режиме искусственного восполнения по результатам опытно-фильтрационных работ.

По данным инфильтрации в опытном бассейне на участке проектируемой системы искусственного восполнения подземных вод определены начальная скорость инфильтрации $v_0 = 2$ м/сут и комплексный фильтрационный параметр илистого осадка $K_\delta = 0,8$ кг/сут на 1 м^2 . В соответствии с техническими условиями эксплуатации проектируемых бассейнов максимальная глубина наполнения водой принята равной 2 м, а мутность воды с учетом ее отстаивания $M = 10$ мг/л.

Общая продолжительность фильтроцикла (t_ϕ) принимается 170 сут при общей длительности чисток в году 25 сут. Требуется определить среднюю скорость инфильтрации бассейнов при сложном режиме их эксплуатации.

Первоначально по формуле (IX.17) определяем продолжительность первого периода эксплуатации бассейнов с постоянной начальной скоростью $v_0 = 2$ м/сут:

$$t_1 = \frac{10^3 K_\delta h}{v_0^2 M} = \frac{10^3 \cdot 0,8 \cdot 2}{2^2 \cdot 10} = 40 \text{ сут.}$$

Таким образом, в течение первого периода продолжительностью 40 сут инфильтрация будет идти со средней скоростью 2 м/сут. Затем по формуле (IX.20) находим коэффициент сопротивления заиленного слоя в конце первого периода при $h_1 = 2$ м и $v_0 = 2$ м/сут

$$A_{01} = \frac{h_1}{v_0} = \frac{2}{2} = 1 \text{ сут.}$$

Скорость инфильтрации на каждый момент времени второго периода при $h = \text{const} = 2$ м определена по формуле (IX.19). Результаты расчетов сведены в табл. 9.

Прогнозный расчет изменяющейся скорости инфильтрации
для второго периода при $B^{**} = 10^3 \cdot 800 \text{ кг/м}^2$

t_s , сут	A^*	$\frac{A}{B}$	$1 + \left(\frac{A}{B}\right)$	$\sqrt{1 + \left(\frac{A}{B}\right)}$	$\frac{v_t = v_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{A}{B}\right)}}$
1	40	0,04	1,04	1,02	1,96
2	80	0,10	1,10	1,05	1,90
5	200	0,25	1,25	1,12	1,78
10	400	0,50	1,50	1,23	1,63
20	800	1,00	2,00	1,41	1,40
40	1600	2,00	3,00	1,73	1,16
50	2000	2,50	3,50	1,87	1,07
80	3200	4,00	5,00	2,24	0,98
100	4000	5,00	6,00	2,45	0,82
120	4800	6,00	7,00	2,65	0,75

* $A = 2hMt_s$.

** $B = 10^3 K_{\delta} A_0$.

Средняя скорость инфильтрации в течение второго периода, найденная как средневзвешенная по времени, составила 1,05 м/сут в течение 120 сут.

Коэффициент фильтрационного сопротивления заилненного слоя на конец второго периода при $h_2 = 2$ м и $v_2 = 0,75$ м/сут определяют с помощью формулы (IX.20)

$$A_{02} = \frac{h_2}{v_2} = \frac{2}{0,75} = 2,67 \text{ сут.}$$

Затем с использованием формулы (IX.11) рассчитываются уменьшающиеся во времени скорость инфильтрации и глубина наполнения бассейна водой в течение третьего периода инфильтрации, при опорожнении бассейнов.

Результаты расчетов сведены в табл. 10.

Таблица 10

Прогнозный расчет изменяющихся скорости инфильтрации и глубины
наполнения для третьего периода при $v_2 = 0,75$ м/сут и $h_2 = 2$ м

t_s , сут	$-\frac{t_s}{A_{02}}$	v_t , м/сут	h_t , м
1	-0,375	0,52	1,37
2	-0,750	0,36	0,94
5	-1,875	0,12	0,31
10	-3,750	0,02	0,05
12	-4,500	0,008	0,02
14	-5,250	0,004	0,01

Как видно из табл. 10 продолжительность третьего периода инфильтрации может быть принята равной 10 сут, так как после этого скорость инфильтрации становится настолько ничтожной, что ею можно пренебречь. Средняя в течение третьего периода скорость инфильтрации при его продолжительности 10 сут составила 0,21 м/сут.

Полученные расчетные данные для всех периодов работы бассейнов должны быть нанесены на график сложного режима их эксплуатации. Средняя за фильтроцикл скорость инфильтрации определена по формуле

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_1 t_1 + v_2 t_2 + v_3 t_3}{t_1 + t_2 + t_3} = \frac{2 \cdot 40 + 1,05 \cdot 120 + 0,21 \cdot 10}{40 + 120 + 10} = 1,22 \text{ м/сут.}$$

Средняя годовая скорость инфильтрации найдена исходя из условия, что в течение года бассейн будет работать два фильтроцикла по 170 сут

$$v_r = \frac{\sum v_{\text{ср}} t_{\text{ф}}}{T} = \frac{1,22 \cdot 170 + 1,22 \cdot 170}{365} = 1,14 \text{ м/сут.}$$

Значения средних скоростей инфильтрации из бассейнов при сложном режиме их работы в зависимости от различных величин комплексного фильтрационного параметра, глубин наполнения бассейнов и допустимой мутности подаваемой на инфильтрацию воды приведены в табл. 11.

Таблица 11

Ориентировочные величины средних скоростей инфильтрации за фильтроцикл $v_{\text{ср}}$ и годовой v_r (м/сут) для различных значений комплексного фильтрационного параметра $K\delta$, глубин наполнения бассейнов h_0 и допустимой мутности воды M

К _б , кг/сут на 1 м ²	M = 20 мг/л						M = 10 мг/л					
	h ₀ = 1,5 м		h ₀ = 2,0 м		h ₀ = 2,5 м		h ₀ = 1,5 м		h ₀ = 2,0 м		h ₀ = 2,5 м	
	v _{ср}	v _r	v _{ср}	v _r	v _{ср}	v _r	v _{ср}	v _r	v _{ср}	v _r	v _{ср}	v _r
0,5	0,6	0,5	0,7	0,6	0,8	0,7	0,9	0,8	1,0	0,9	1,2	1,1
1,0	0,9	0,8	1,0	0,9	1,2	1,1	1,3	1,2	1,4	1,3	1,6	1,5
2,0	1,3	1,2	1,4	1,3	1,6	1,5	1,8	1,7	2,0	1,9	2,3	2,1
3,0	1,5	1,4	1,8	1,7	2,0	1,9	2,2	2,0	2,5	2,3	2,8	2,6
4,0	1,8	1,7	2,1	2,0	2,3	2,1	2,5	2,3	2,9	2,7	3,3	3,1
5,0	2,0	1,9	2,3	2,1	2,6	2,4	2,8	2,6	3,3	3,1	3,6	3,4

РАСЧЕТ ПОГЛОЩАЮЩИХ СКВАЖИН

Расчет заключается в определении изменений удельного расхода водопоглощения в течение фильтроцикла в результате заилиния фильтра и прискважинной зоны пород и суммарного расхода

водопоглощения системы взаимодействующих нагнетательных скважин.

Для прогноза водопоглощения нагнетательных скважин при кольматации пород применимы как теоретические, так и эмпирические зависимости; последние — при фильтрации мутных вод в крупнопористых галечниках или трещиноватых и закарстованных породах, для которых развитие кольматации представляет собой исключительно сложную картину. При восполнении способом налива в скважины, заложенные в песчаных отложениях, возможно использование для прогнозных расчетов формул, учитывающих режим «пленочной» фильтрации воды (Сычев, Волосевич, 1973 г.). Для трещиноватых и высокопроницаемых галечниковых пород, как показывает опыт искусственного восполнения подземных вод, при постоянном расходе нагнетания в скважину Q_0 величина напора ΔH может изменяться во времени t по эмпирическим зависимостям следующего вида:

$$\Delta H = a + b\sqrt{t} \quad (\text{IX.27})$$

или

$$\Delta H = a + b \lg t. \quad (\text{IX.28})$$

Аппроксимация опытных кривых нагнетания производится методом выравнивания путем построения графиков функций

$$\Delta H = f(\sqrt{t}) \text{ и } \Delta H = f(\lg t). \quad (\text{IX.29})$$

Для последующих прогнозных расчетов принимается та функция, график которой будет иметь наилучшее приближение к прямой линии. Параметры a и b опытных кривых определяются графическим способом, методом наименьших квадратов или уравновешенных погрешностей. При оценке их графическим способом отрезок, отсекаемый на оси ординат графиков (IX.29), будет соответствовать параметру a , тангенс угла наклона прямой — параметру b . Последний может быть также рассчитан по формулам (IX.27) и (IX.28) по координатам любых точек, взятых из графиков (IX.29).

Для режима нагнетания с постоянным расходом изменение удельного расхода водопоглощения q_t , приходящегося на 1 м повышения уровня, может подчиняться экспоненциальной зависимости

$$q_t = q_0 e^{-\alpha t}, \quad (\text{IX.30})$$

где q_0 — удельный расход водопоглощения в начале опыта, м³/сут на 1 м;

α — коэффициент уменьшения расхода при нагнетании, определяемый опытным путем на два момента времени по формуле, аналогичной (IX.3)

$$\alpha = \frac{\ln q_1 - \ln q_2}{t_2 - t_1}. \quad (\text{IX.31})$$

Для поглощающих скважин, оборудованных гравийными фильтрами, В. С. Алексеевым (1974 г.) предложены зависимости, позволяющие прогнозировать водопоглощение нагнетательных скважин во времени в зависимости от изменения текущей насыщенности кольматантом порового пространства гравийной обсыпки.

Расчет производительности нагнетательных скважин можно производить по теоретическим зависимостям, в которых несовершенство скважин по степени вскрытия и степень кольматации фильтра и прискважинной зоны пород оценивается показателем общего безразмерного сопротивления:

$$Q_c = \frac{4\pi km \Delta H}{\ln \frac{2,25at}{r_0^2} + 2\xi}, \quad (\text{IX.32})$$

где km — водопроницаемость пласта, $\text{м}^2/\text{сут}$;

ΔH — напор нагнетания, м;

a — коэффициент пьезопроводности, $\text{м}^2/\text{сут}$;

r_0 — радиус скважин, м.

Общее сопротивление ξ находится из формулы (IX.32). Сопротивление, обусловленное только кольматацией фильтра и прискважинной зоны пород ξ_k , рассчитывается по разности между общим сопротивлением и начальным, определяемым по данным опытной откачки или в начале опытного нагнетания.

Дополнительное фильтрационное сопротивление ξ_k для скважин с гравийными фильтрами может быть также найдено по формуле (Алексеев, 1974 г.):

$$\xi_k = \left[\frac{K_n}{K_0} \exp(3\Delta C \gamma_{cp} t) - 1 \right] \ln \frac{R_0}{R_\phi}, \quad (\text{IX.33})$$

где K_n — коэффициент фильтрации водоносного пласта, $\text{м}/\text{сут}$;
 K_0 — начальный коэффициент фильтрации гравийной обсыпки, $\text{м}/\text{сут}$;

ΔC — концентрация взвешенных веществ в жидкости в зоне кольматажа, равная разности концентрации этих веществ в нагнетаемой и пластовой воде;

γ_{cp} — осредненный коэффициент кольматации, характеризующий скорость протекания процесса в уравнении кинетики;

R_0 — радиус зоны кольматации (гравийной обсыпки), м;

R_ϕ — радиус фильтра скважины, м.

Уравнение (IX.33) удобно решать графоаналитическим методом на два момента времени t_1 и t_2 периода нагнетания. Для этого строят график зависимости в координатах $Y = f(t)$, где

$$Y_i = \frac{\xi_i + \ln \frac{R_0}{R_\phi}}{\ln \frac{R_0}{R_\phi}} = \frac{K_n}{K_0} \exp(3\Delta C \gamma_{cp} t_i). \quad (\text{IX.34})$$

Полученная прямая на графике будет иметь угловой коэффициент, равный

$$\operatorname{tg} \theta = 3 \Delta C \gamma_{\text{cp}} = \frac{\ln Y_2 - \ln Y_1}{t_2 - t_1}. \quad (\text{IX.35})$$

Начальная ордината, отсекаемая прямой, составит $\ln K_{\text{п}}/K_0$. Таким образом, с использованием графоаналитического метода можно определить все необходимые параметры, в первую очередь γ_{cp} , из формулы (IX.35) для последующего прогноза $\xi_{\text{к}}$.

Работа поглощающей скважины с постоянным расходом нагнетания может продолжаться до тех пор, пока напор в ней не достигнет максимально допустимой величины ΔH_{max} . Тогда продолжительность периода, в течение которого возможно производить закачку с постоянным расходом (Алексеев, 1974 г.):

$$T = \frac{\ln \left[\frac{K_0}{K_{\text{п}}} \left(\frac{2\pi K_{\text{п}}^m \Delta H_{\text{max}}}{Q_0 \ln \frac{R_0}{R_{\Phi}}} + 1 \right) \right]}{3 \Delta C \gamma_{\text{cp}}}, \quad (\text{IX.36})$$

где ΔH_{max} — разность между максимально возможным пьезометрическим уровнем в скважине при нагнетании и статическим уровнем, м.

Необходимое количество нагнетательных скважин N для получения суммарного расхода искусственного восполнения $Q_{\text{н}}$ составит

$$N = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{с}}}, \quad (\text{IX.37})$$

где $Q_{\text{с}}$ — средний расход водопоглощения одной скважины.

Общая отдача воды в горизонт W системой поглощающих скважин за период нагнетания t будет равна

$$W = Q_{\text{н}} t = N Q_{\text{с}} t = \sum Q_i t_i. \quad (\text{IX.38})$$

ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ, ЭТАПЫ РАЗВЕДКИ И ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ИХ ВОСПОЛНЕНИИ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ

Задача искусственного восполнения подземных вод обычно возникает при их недостатке как на действующих, так и на вновь проектируемых водозаборах.

При искусственном восполнении подземных вод питание и отбор их могут происходить как непрерывно, так и периодически. Однако и при непрерывном питании и отборе величина их расхода может изменяться.

При использовании поверхностных вод для искусственного восполнения подземных вод следует учитывать, что качество поверхностных вод изменяется в течение одного года (в основном и в особенности может ухудшаться в паводки), а также в течение ряда лет.

В некоторых случаях нецелесообразно в отдельные периоды ухудшения качества поверхностных вод использовать их для искусственного восполнения. В отдельные периоды может не хватать расхода поверхностных вод для искусственного восполнения. В связи с этим возникает необходимость восполнения подземных вод с созданием их емкостных запасов (аналогично с водохранилищами поверхностных вод) на период перерыва подпитывания подземных вод. Такие емкостные запасы необходимы также при перерыве в работе в период очистки инфильтрационных и других сооружений и их ремонта.

В некоторых случаях при искусственном восполнении подземных вод учитывается однолетнее и многолетнее регулирование емкостных запасов.

Подземные воды могут залегать близко от поверхности, и тогда искусственное восполнение их можно производить путем инфильтрации с поверхности земли. При глубоком залегании и в особенности при наличии сверху восполняемых подземных вод водонепроницаемых пород значительной мощности (более 3—4 м) приходится устраивать инфильтрационные скважины; окончательно этот вопрос решается путем техникоэкономического анализа.

При искусственном восполнении учитывается улучшение качества воды в инфильтрационных (с поверхности воды) сооружениях и в водоносном горизонте. В некоторых же случаях (см. гл. IV)

приходится производить предварительное и даже последующее улучшение качества воды в специальных очистных сооружениях.

И наконец, искусственное восполнение подземных вод следует оценивать и экономически, сравнивая разные варианты получения достаточного количества воды (поверхностной и подземной) необходимого качества. При выборе вариантов важнейшим показателем для хозяйственно-бытовых и подобных потребностей в воде являются гигиенические требования.

Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном их восполнении инструкции в ГКЗ не разработано. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном их восполнении является основанием (документом) для проектирования, строительства и эксплуатации подземных вод. Оценку запасов в сокращенном виде целесообразно делать не только в конце разведки подземных вод, но и на промежуточных стадиях, чтобы обосновать целесообразность дальнейших изысканий. Такие промежуточные оценки следует давать в соответствии с достоверностью полученных данных — приближенно, кратко и аргументированно. Эксплуатационные запасы подземных вод определяются в кубических метрах в сутки и должны соответствовать требованиям по качеству воды, указанным в ГОСТе и соответствующих указаниях. Эксплуатационные запасы должны учитывать потребность на перспективу. Представляемые эксплуатационные запасы должны удовлетворять требованиям законодательства СССР и союзных республик и быть согласованы с соответствующими органами санитарного надзора Министерства здравоохранения СССР и республик.

Для оценки соответствия проведенных изысканий требованиям проектирования составляется ТЭД или ТЭО и на их основании даются кондиции.

В ТЭД приводятся краткое описание водоносного горизонта, обоснование получаемого расхода и качества воды, а также расчеты инфильтрационных сооружений, водозаборов подземных вод, а если нужно предварительной и последующей очистки воды. По источнику восполнения (поверхностным водам) дается его характеристика — расход, уровни, качество воды и их изменения во времени. По подземным водам как источника восполнения приводятся данные, как для эксплуатируемого восполняемого водоносного горизонта. По сооружениям искусственного восполнения подземных вод приводятся основные параметры их работы, схема расположения, схема и обоснование улучшения качества воды в них, а также режим работы. В случае необходимости приводятся обоснование, схема и режим работы сооружений предварительной водоподготовки. Кроме того, дается общая схема расположения и режима работы всей системы искусственного восполнения. Обосновывается и приводится также общая схема улучшения качества воды, получаемой из водозаборов при искусственном их восполнении. При необходимости рассматрива-

ется сравнение конкурирующих вариантов и выбор наиболее благоприятного из них.

В кондициях приводятся основные данные по элементам искусственного восполнения:

- 1) общая схема искусственного восполнения;
- 2) схема улучшения качества воды;
- 3) данные по водозабору;
- 4) данные по источнику восполнения;
- 5) данные по инфильтрационным сооружениям;
- 6) данные по сооружениям предварительной и последующей очистке.

При проведении изысканий для искусственного восполнения подземных вод предусматривается четыре стадии: прогнозная, поисковая, предварительная и детальная, при эксплуатации искусственного восполнения подземных вод проводятся наблюдения за режимом подземных вод и работой сооружений, а при необходимости увеличения запасов и дополнительная разведка.

Стадия предварительной разведки является одной из наиболее ответственных, так как в этой стадии объем исследований значительный и по ней делаются выводы о проведении детальной разведки для окончательного суждения об эксплуатации подземных вод.

Общими для всех отчетов по всем стадиям являются следующие требования:

- 1) целеустремленность, четкость и краткость изложения. Приводить в отчете следует такой материал, который может быть использован для освещения рассматриваемого вопроса и необходим для выводов;
- 2) в предисловии к отчету должно быть изложено задание с указанием потребности в подземных водах и требования к ним;
- 3) каждый отчет должен иметь сведения о геологической и гидрогеологической изученности; при этом необходимо давать оценку материалам опубликованных и неопубликованных работ. Список этих работ должен даваться в приложении к отчету;
- 4) в отчете должно быть дано геологическое и гидрогеологическое описание: более кратко для района распространения водоносного горизонта и подробно для участка детальных исследований;
- 5) отчет должен иллюстрироваться картами, гидрогеологической сводной колонкой (или несколькими), гидрогеологическими разрезами, а также разрезами скважин и прочими графическими приложениями. По намечаемому к эксплуатации водоносному горизонту в соответствии с изученностью должны быть приведены расчетные показатели;
- 6) в отчете должна быть приведена гидрологическая характеристика поверхностных вод с данными о режиме расходов, уровней и качества воды с их изменениями во времени;
- 7) в случае использования подземных вод для искусственного

восполнения приводятся данные по гидрогеологическим условиям (как в пунктах 3, 4 и 6);

8) При наличии существующего водозабора приводятся детальные данные о нем и режиме его работы, указываются дебиты скважин, их уровни, качество воды и проч.;

9) в отчете по оценке эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением с детальностью, соответствующей стадии изысканий, приводятся описание и расчеты сооружений для такого восполнения. Например, для поисковой и прогнозной стадий такое описание дается весьма кратко, а для детальной стадии — детальное с расчетами;

10) данные полевых наблюдений, разведочных, опытных и лабораторных работ, а также наблюдений за режимом подземных вод должны приводиться в приложениях в виде таблиц и графиков;

11) отчет должен сопровождаться аннотацией, кратко излагающей его содержание. В конце отчета даются выводы по оценке эксплуатационных запасов и соображения о дальнейших гидрогеологических исследованиях (в случае необходимости).

ПРИНЦИПЫ И СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

При искусственном восполнении подземных вод без регулирующей их емкости необходимо предусматривать резервные инфильтрационные сооружения на период их чистки и ремонта.

Искусственное восполнение подземных вод позволяет при надлежащих схеме и технологическом режиме получать высококачественный источник водоснабжения. Устройство искусственного восполнения определяется потребностью в воде, а также возможностью и целесообразностью. Возможность в свою очередь определяется природными (с учетом их изменений), техническими и санитарными условиями, а целесообразность — экономическими и гигиеническими показателями. Следовательно, оценка эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном их восполнении должна учитывать комплексы природных условий с их изменением при эксплуатации и инженерных мероприятий для увеличения количества этих запасов; обязательно должна быть оценка получения кондиционного для заданных требований качества воды.

В оценку суммарного количества эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном восполнении Q_3 входят количества воды: 1) обеспеченные подачей из инфильтрационных сооружений Q_n ; 2) в результате привлеченной инфильтрации из естественных и искусственных водоемов (включая водохранилища, реки, каналы и проч.) $Q_{пр}$; 3) поступления от естественного питания подземных вод Q_e и 4) инфильтрация с орошаемых площадей Q_o , а также сооружений, из которых может поступать вода:

$$Q_3 = Q_n + Q_{пр} + Q_e + Q_o. \quad (X.1)$$

При искусственном восполнении подземных вод происходит сработка емкостных запасов. Эта сработка восполняется периодически или непрерывно; в последнем случае такой сработки фактически не будет и емкостные дополнительные запасы не создадутся. Часть восполнения сработанных емкостных запасов (при периодическом восполнении) может быть получена также за счет естественного питания подземных вод или привлечения из естественных и искусственных водоемов, а также в результате инфильтрации с орошаемых площадей.

Искусственно восполняемой подземной водой будем называть такую воду, которая получается при инфильтрации с помощью специальных сооружений (инфильтрационные бассейны, поглощающие скважины и др.). В случае если подземная вода получается в результате устройства берегового инфильтрационного водозабора и при этом приходится улучшать фильтрационные свойства русловых отложений, такой способ можно отнести к искусственному восполнению.

Доля $\alpha_{э.н}$ получаемой воды от искусственного подпитывания в балансе всех эксплуатационных запасов подземных вод на конкретном участке и является показателем участия искусственного восполнения

$$\alpha_{э.н} = \frac{Q_n}{Q_э} \quad (X.2)$$

Если величина искусственного восполнения подземных вод близка к полной величине эксплуатационных запасов, то и $\alpha_{э.н}$ близко к единице.

Важным показателем искусственного восполнения подземных вод является отношение эксплуатационных запасов, получаемых за счет искусственного восполнения Q_n , к расходу воды, подаваемому для искусственного восполнения $Q_{п.н}$, т. е. коэффициент полезного действия сооружений искусственного восполнения

$$\alpha_n = \frac{Q_n}{Q_{п.н}} \quad (X.3)$$

Следует стремиться, чтобы потери подаваемой воды для искусственного восполнения максимально сокращались. Величина α_n чаще составляет 0,7—0,8, но обычно изменчива во времени.

Так как искусственное восполнение подземных вод производится за счет подпитывания их из поверхностных вод, а в некоторых случаях и за счет подземных же вод, то в оценку эксплуатационных запасов искусственного восполнения подземных вод входит анализ и расчеты использования поверхностных или подземных источников восполнения. При устройстве инфильтрационных бассейнов целесообразно, чтобы под дном их находился не полностью заполненный водой слой песка (зона аэрации), в этом случае при наличии воздуха (с кислородом) может интенсивно происходить улучшение качества воды. Далее вода поступает

в водоносный горизонт и затем в водозаборы подземных вод. Все это определяется расчетом. При этом расчеты производятся с учетом изменяющейся потребности в течение года и на расчетный срок, а также с учетом требования получения воды необходимого качества, изменчивости качества воды источника восполнения, и с учетом заиливания инфильтрационных сооружений и их очистки.

При качестве воды источника восполнения, не отвечающем условиям очистки в инфильтрационных сооружениях и в водоносном горизонте, предусматривается предварительная водоподготовка. Кроме того, следует иметь в виду, что и после получения искусственно восполняемой подземной воды из водозаборов, если она не соответствует требованиям ГОСТ 2874—73, проектируется дополнительное улучшение качества воды, например, хлорирование, обезжелезивание и др.

Расчеты производительности водозаборов производятся гидродинамическим, гидравлическим методами и методом аналогии; применяют также аналоговые, цифровые и гибридные вычислительные машины.

Особенностью оценки эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном восполнении являются расчеты улучшения качества воды; эти расчеты должны быть комплексно увязаны с отмеченными выше расчетами производительности всех сооружений и режимом их работы.

Для сложных случаев, например, когда искусственное восполнение подземных вод осуществляется из нескольких источников (река, каналы, специальные сооружения для восполнения, орошаемая территория и проч.), целесообразным может оказаться решение на аналоговых машинах, а также гидравлическим методом на основе специально поставленных опытных работ.

Таким образом, оценка эксплуатационных запасов подземных вод должна производиться комплексно с учетом условий и требований как по расходу воды, так и по ее качеству. Необходимо также учитывать стадийность (этапы) исследований и соответственно этому стадийность оценки указанных запасов с отношением их к категориям по степени достоверности и изученности.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением для объекта включает:

- 1) анализ потребности в воде по очередям строительства и на перспективу с учетом колебания во времени и требований к качеству воды, а также расчетного срока и сроков по отдельным очередям освоения;

- 2) анализ и учет эксплуатируемых источников водоснабжения, их дальнейшего использования и новых источников для развития водоснабжения. Соображения о потребности в воде других объектов;

- 3) анализ геологических и гидрогеологических условий, включая параметры водоносного горизонта и состав воды;

- 4) анализ климатических условий;

5) анализ источника искусственного восполнения — оценка количества воды и ее качества с учетом изменчивости во времени; при анализе меженного расхода поверхностных вод, при недостатке их, рекомендуется учитывать возможность использования паводков. При оценке качества воды источника следует особое внимание обратить на вредные и трудно поддающиеся очистке вещества, а также на периодическое развитие организмов в воде и в особенности планктона;

6) анализируется и обосновывается в случае необходимости предварительная водоподготовка, составляется ее схема и производятся необходимые расчеты очистных сооружений;

7) анализируется необходимость, возможность и целесообразность создания регулирующей емкости подземных вод, что является обязательным при недостатке минимального расхода источника восполнения или сильного ухудшения качества воды этого источника в отдельные периоды, например в период паводка рек. Регулирование емкостных запасов подземных вод может оказаться необходимым в связи с неравномерной производительностью инфильтрационных сооружений (которая уменьшается к концу инфильтрационного цикла) и прочих сооружений, а также в связи с их ремонтом;

8) составление общей схемы использования подземных вод с исчислением их восполнением и определением расчетных схем с вариантами восполнения их и без восполнения в отдельные периоды;

9) производство расчетов инфильтрационных сооружений (бассейнов, скважин и проч.);

10) гидрогеологический расчет эксплуатационных запасов подземных вод, который производится по вариантам схем, принятых в п. 8;

11) проверку совместимости воды, поступающей на восполнение подземных вод с естественными подземными водами, а также взаимодействия ее с породами, через которые происходит фильтрация вод;

12) анализ санитарных условий и обоснование схемы зон санитарной охраны для сохранения, а если требуется и для улучшения условий;

13) по выбранной схеме или нескольким схемам делается экономическая оценка по укрупненным показателям капиталовложений, эксплуатационных затрат, себестоимости воды; экономический анализ сравнения по конкурирующим вариантам, а также анализ стоимости изысканий;

14) исследования по этапам с детальностью и точностью, соответствующей изученности данной стадии; такие расчеты сопровождаются геолого-экономической оценкой.

Отличительной особенностью оценки эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном их восполнении является анализ источников такого восполнения как по количеству, так

и по качеству, а также расчет инфильтрационных сооружений, имея в виду при этом улучшение качества воды и включая при необходимости специальную очистку.

ЭТАПЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ИХ ВОСПОЛНЕНИИ С УЧЕТОМ СТАДИЙНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время, как отмечено ранее, разведку принято проводить последовательно по стадиям разведок: прогнозной, поисковой, предварительной, детальной и эксплуатационной. В последней стадии при эксплуатации подземных вод ведутся стационарные наблюдения за их режимом, а затем при необходимости ставятся дополнительные исследования.

В табл. 12 для каждой стадии приводятся показатели по изученности (основные категории), по задачам и целям отдельных стадий, по способам и методам исследований и их анализу, по выделению и выбору участков для искусственного восполнения подземных вод, по оценке эксплуатационных запасов подземных вод при их восполнении, по геолого-экономической оценке, по оценке санитарных условий и по кондициям.

Для каждой стадии разведки, а иногда и в процессе ее делается анализ с оценкой эксплуатационных запасов с точностью, соответствующей каждой стадии, а для первых трех стадий (прогнозная, поисковая и предварительная) с выводами о дальнейших исследованиях, их составе и направлении. После детальной разведки дается оценка эксплуатационных запасов, как обоснование для проектирования эксплуатации подземных вод с искусственным их восполнением.

Показатели, приведенные в табл. 12, в соответствующих случаях могут уточняться. В зависимости от изученности и условий отдельные стадии изысканий могут объединяться, а некоторые исключаться.

Рассмотрим некоторые детали принципов оценки эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном восполнении по этапам, а также принципы проведения этих исследований.

Прежде всего на прогнозной и поисковой стадиях выясняется потребность в воде на первую очередь строительства, на расчетный срок и перспективу. При искусственном восполнении перспективный срок принимается 25—30, 50 и 100 лет, а расчетный — 10—30 лет. При этом учитываются (с анализом) в районе объекта строительство, проектирование и эксплуатация подземных и поверхностных вод и для других объектов. Намечаются участки искусственного восполнения подземных вод. Кроме того, определяются требования к качеству воды, подаваемой на инфильтрационные сооружения. На стадии предварительной разведки анализируется окончательный выбор участка для восполнения подземных вод и его источник, а также производится предварительная

Схема последовательности оценки эксплуатационных запасов, изысканий и гидрогеолого-экономической оценки подземных вод с искусственным их восполнением для отдельных объектов водоснабжения

Показатели, цели и задачи, результаты для отдельных стадий	Стадии работ				Стационарные наблюдения при эксплуатации
	Прогнозная	Поисковая	Предварительная разведка	Детальная разведка	
Изученность (основные категории)	C ₂	C ₂ + C ₁	C ₁	C ₁ + B	B + A
Задачи и цели	Ориентировочное выявление возможностей удовлетворения потребности в воде с учетом искусственного восполнения	Уточнение возможностей удовлетворения потребности в воде с учетом искусственного восполнения. Обоснование и предварительный выбор участков для искусственного восполнения. Обоснование для проведения разведочных работ	Предварительная оценка эксплуатационных запасов подземных вод с их восполнением. Схема искусственного восполнения. Обоснование для проведения детальной разведки с выбором участков. Планирование использования подземных вод с их восполнением	Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с их восполнением для утверждения. Обоснование для проектирования и эксплуатации искусственного восполнения с окончательно аргументированной ее схемой	Для уточнения эксплуатационных запасов с их восполнением и возможностью увеличения эксплуатации. Для уточнения текущего планирования эксплуатации
Способы и методы 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 (литературные, фондовые и натурные данные), обследование на месте	Бурение и опробование поисковых скважин на намечаемых участках. Организация изучения режима поверхностных и подземных вод. Лабораторные исследования пород и вод для искусственного восполнения на выбранных участках. Приближенный теоретический анализ искусственного восполнения на предварительно выбранных участках. Анализ всего материала с учетом данных прогнозной стадии	Бурение и опробование разведочных и опытных скважин. Изучение режима подземных и поверхностных вод. Детальные лабораторные исследования пород и воды для искусственного восполнения на выбранных участках. Лабораторные опыты по искусственному восполнению подземных вод. Предварительные расчеты искусственного восполнения	Бурение и опробование опытно-разведочных и опытно-эксплуатационных скважин на выбранных участках. Детальный анализ всего материала. Продолжение наблюдений за режимом подземных и поверхностных вод. Опытные работы по искусственному восполнению подземных вод	Наблюдения за режимом подземных вод, сооружениями по искусственному восполнению, водозаборными сооружениями, систематизация и анализ. В случае необходимости бурение разведочно-эксплуатационных скважин и их опробование, опытные исследования на эксплуатационных сооружениях по искусственному восполнению подземных вод с их анализом. Расчеты для увеличения искусственного восполнения подземных вод
Выделение участков для искусственного восполнения подземных вод	Ориентировочное выделение	Предварительный выбор	Выбор участков	Подтверждение выбора участков	Возможное расширение участка (участков) и обоснование изменения параметров эксплуатации

Показатели, цели и задачи, результаты для отдельных стадий	Стадии работ				Стационарные наблюдения при эксплуатации
	Прогнозная	Поисковая	Предварительная разведка	Детальная разведка	
Оценка эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном их восполнении (со схемой и расчетами сооружений для восполнения и водозаборов)	Прогнозная	Ориентировочная	Предварительная	Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением	Уточнение эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением
Гидрогеолого-экономическая оценка	Гидрогеолого-экономические соображения	Ориентировочная гидрогеолого-экономическая оценка	ТЭД	Уточнение ТЭД	Уточнение ТЭД
Оценка санитарных условий	Ориентировочная	Предварительная	Конкретная	Уточнение оценки	Уточнение оценки
Кондиции	Не составляются	Ориентировочные	Предварительные	Уточненные	Уточнение кондиций

оценка эксплуатационных запасов. По данным детальной разведки все уточняется и представляются запасы, как обоснование для проектирования; при этом должны быть представлены основные расчеты предварительной водоподготовки (если она нужна), инфильтрационных сооружений и восполнения запасов подземных вод.

В эксплуатационных запасах подземных вод при искусственном их восполнении теоретические расчеты их расхода с учетом опытных данных, могут быть достаточно достоверны, а после детальной разведки оценены в большинстве случаев по категориям А и В, но оценка качества воды, в особенности при плохом исходном ее составе (источника восполнения), является сложной и в некоторых случаях по оценке качества воды запасы могут быть отнесены к категориям В + С₁ с правом проектирования.

Особенностью рассматриваемых запасов является также необходимость обоснования их параметрами для расчетов восполнения, полученными при лабораторных исследованиях и на опытных фильтрационных сооружениях в периоды предварительной и детальной разведок.

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С УЧЕТОМ ИХ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПОЛНЕНИЯ

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Завершающим этапом разведки подземных вод с учетом их искусственного восполнения является оценка эксплуатационных запасов. В настоящей главе изложены далеко не полностью методические приемы применительно к ранее рассмотренным типовым гидрогеологическим условиям формирования в верхней части гидрогеосферы искусственных запасов и ресурсов подземных вод (см. табл. 1).

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного восполнения в принципе может выполняться с использованием общепринятых в нашей стране методов аналогии, гидравлического, балансового, гидродинамического и метода математического моделирования на современных АВМ.

Метод аналогии для приближенной оценки может быть применен при одном непременном условии, если сравниваемые между собой участки водозаборов с искусственным восполнением (разведанный и действующий в качестве эталонного аналога) имеют одинаковые или близкие граничные условия фильтрационного потока в плане и разрезе, условия формирования эксплуатационных запасов и системы искусственной инфильтрации. В этом случае для расчетов на разведанном водозаборе могут быть использованы средние значения гидрогеологических параметров, определенных по данным эксплуатации эталонного аналога.

Для переоценки эксплуатационных запасов действующих водозаборов, которые должны быть переведены в систему искусственного восполнения, можно применить гидравлический метод в сочетании с балансовым при условии, если на участке по результатам инфильтрации из опытного бассейна получены достоверные данные, указывающие на влияние опытной инфильтрации на режим уровня подземных вод и дебита водозаборных скважин.

Метод математического моделирования на АВМ можно рассматривать по существу как разновидность гидродинамического метода оценки эксплуатационных запасов с учетом их искусственного восполнения. Применять метод математического моделирования целесообразно на объектах, характеризующихся сложностью гидрогеологических условий: фильтрационная неодно-

родность продуктивного водоносного горизонта, сложные граничные условия фильтрационного потока, сложные гидрохимические условия и др. Такие сложные природные условия не могут быть схематизированы в виде простых линейных или круговых контуров.

В остальных случаях оценку эксплуатационных запасов пресных подземных вод с учетом их искусственного восполнения следует производить с помощью гидродинамического метода с использованием известных аналитических зависимостей.

В настоящем разделе изложены преимущественно гидродинамические методы оценки запасов. При этом в аналитических решениях авторами использованы методы источников и стоков, сложения фильтрационных течений, а также зеркальных отображений. Гидродинамическое несовершенство водозаборов, инфильтрационных сооружений, поверхностных водотоков и водоемов учитывается при этом с помощью метода линейных фильтрационных сопротивлений. Рассмотрены аналитические решения для стационарного и нестационарного режима фильтрации. Принципиально новым в полученных аналитических решениях является методический подход к оценке эксплуатационных запасов с учетом требований охраны подземных вод от истощения.

Методика гидродинамических расчетов водозаборов в системах искусственного восполнения подземных вод применительно к условиям их проектирования и эксплуатации разрабатывалась также Ф. М. Бочеве́ром, Н. Н. Ла́шиним, В. С. Усе́нко и другими, которыми получен ряд новых аналитических зависимостей, учитывающих неравномерность инфильтрации воды из систем искусственного восполнения запасов подземных вод. Методика таких расчетов изложена в опубликованной работе коллектива авторов ВНИИ ВОДГЕО «Рекомендации по проектированию и эксплуатации систем искусственного пополнения запасов подземных вод» (1976 г.).

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного восполнения может быть выполнена по двум основным направлениям, которые определяются:

- 1) наличием на разведочном участке действующего водозаборного сооружения;
- 2) отсутствием на разведочном участке водозаборного сооружения.

Для первого направления дебит существующего водозабора известен и изучен, изучены гидрогеологические условия участка водозабора предыдущими исследованиями. Известна дополнительная заявка в воде, что вызывает необходимость увеличить общий дебит водозаборного сооружения путем искусственного питания подземных вод.

По результатам дополнительных разведочных работ получены основные исходные гидрогеологические и гидрологические данные, позволяющие обосновать проект искусственного воспроизводства запасов подземных вод на действующем водозаборе.

В этих условиях оценка эксплуатационных запасов подземных вод по существу сводится к определению общей производительности инфильтрационных сооружений (их количество, общая площадь инфильтрации, примерные размеры), необходимой для обеспечения заданного дополнительного дебита водозаборных скважин, а также к рекомендациям по реконструкции действующего каптажа.

Во втором случае оценка эксплуатационных запасов подземных вод сводится к решению двух задач. Вначале методом гидродинамических расчетов определяется возможный дебит будущего водозабора в естественных условиях питания. Расчеты производятся методом подбора с учетом допустимой величины понижения уровня подземных вод в скважинах водозабора. Затем определяется разница между заявленной потребностью в воде и расчетным суммарным дебитом проектируемого водозабора. По этой разнице расчетным путем определяется производительность инфильтрационных сооружений, необходимая для дополнительного искусственного питания суммарного данного дебита водозабора.

Искусственное инфильтрационное питание подземных вод может быть непрерывно или периодически действующим. Режим искусственного питания на водозаборном участке определяется режимом самого источника питания, мощностью водоносного горизонта, избранного для искусственного восполнения, и другими факторами (см. главу I). В соответствии с режимом искусственного питания должна быть принята и методика аналитических расчетов по оценке эксплуатационных запасов.

При оценке разведанных запасов методом аналогии необходимо строго учитывать соответствие элементов аналогии гидрогеологических условий двух сравниваемых участков и расположение инфильтрационных сооружений. Наиболее важными элементами аналогии являются: граничные условия потока в плане и разрезе, фильтрационные свойства водоносных пород и пород зоны аэрации, режим искусственного питания и др. Кроме того, целесообразно пользоваться обобщающими параметрами — фактическая линейная производительность действующего водозабора (расход в л/с с 1 км длины водозабора) или величина площадного модуля эксплуатационных запасов водозабора — аналога (расход в л/с с 1 км² площади).

В сложных гидрогеологических условиях при резкой изменчивости фильтрационных свойств пород (фильтрационной анизотропии), когда граничные условия потока не могут быть приведены к типовым расчетным схемам, а также в условиях переменного режима источника искусственного питания подземных вод оценку их эксплуатационных запасов целесообразно производить (как отмечалось) методом математического моделирования на современных АВМ.

Во всех случаях можно рекомендовать следующую общую последовательность операций при оценке эксплуатационных запаса-

сов подземных вод с учетом их искусственного воспроизводства.

1. Для решения практических задач по оценке запасов необходимо иметь четко сформулированную заявленную потребность в воде — количество воды (в м³/сут), на какой срок (срок потребления) и для каких целей. Заявленная потребность в воде во всех случаях определяет по существу заданную общую производительность водозаборного сооружения (действующего или проектируемого) — важный параметр для всех методов расчетов эксплуатационных запасов подземных вод.

2. Далее целесообразно определить и гидрогеологически обосновать для водозаборного участка допустимую величину понижения уровня подземных вод — параметр $S_{\text{доп}}$. В практике гидрогеологических работ по оценке эксплуатационных запасов обычно принимается $S_{\text{доп}}$ для грунтовых вод 0,5—0,6 от h_0 (h_0 — мощность водоносного горизонта); для напорных вод — 0,6—0,8 от H_0 (H_0 — величина гидростатического напора). Причем запасы считаются доказанными и достоверными, когда расчетное значение понижения уровня равно или меньше величины $S_{\text{доп}}$.

3. Для составления расчетной схемы разведочного участка необходимо преобразовать геологическую и гидрогеологическую природную обстановку объекта в типовую расчетную схему с учетом граничных условий потока в плане и разрезе, а также фильтрационной неоднородности продуктивного пласта. Составленная типовая расчетная схема служит основанием для выбора готовых аналитических решений для оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

4. Обоснование и выбор по данным опытно-фильтрационных работ средних значений гидрогеологических параметров пласта необходимы для оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Для расчета общей производительности водозаборных скважин необходимо оценить среднее значение коэффициентов водопроницаемости пласта и пьезопроводности (уровнепроводности), водоотдачи (упругой водоотдачи) и др. Для оценки величины искусственного питания необходимы средняя скорость инфильтрации, удельная отдача инфильтрационных сооружений (удельная приемистость поглощающих скважин), величина фильтрационного сопротивления и др. Обоснованные средние значения гидрогеологических параметров принимаются в последующих расчетах эксплуатационных запасов подземных вод.

5. Далее следует принять расчетный срок эксплуатации водозаборных и инфильтрационных сооружений. Условно в расчетах по оценке запасов можно принять срок эксплуатации 30 лет (примерный срок амортизации водозаборного сооружения). Выбранный для расчетов срок эксплуатации необходимо уточнить в соответствии с требованиями инструкции ГКЗ СССР.

6. Определение величины дополнительного искусственного питания подземных вод на водозаборе с целью полного удовлетворения заявленной потребности в воде.

Величина искусственного питания по существу определяет общую производительность инфильтрационных сооружений, их размер, количество бассейнов или нагнетательных скважин и др.

Расчеты могут быть выполнены для двух основных вариантов с учетом значения допустимого понижения уровня подземных вод в водозаборных скважинах. Если на разведочном участке имеется действующий водозабор, то расчеты целесообразно продолжить в следующей последовательности:

а) устанавливается общая производительность водозабора в соответствии с заявленной потребностью в воде Q_1 ;

б) производится контрольный расчет производительности водозабора в естественных условиях в строгом соответствии с величиной допустимого понижения уровня Q_2 ;

в) определяется по разности между Q_1 и Q_2 то количество воды, которое необходимо обеспечить на водозаборе путем искусственного воспроизводства Q_3 . Последняя по существу и определяет общую производительность инфильтрационных сооружений для искусственного питания подземных вод;

г) выполняются завершающие расчеты с целью доказательства реальной возможности получения на объекте заданной производительности инфильтрационных сооружений для искусственного питания подземных вод. В эти расчеты входят: общая производительность, режим работы, размеры, общее количество инфильтрационных сооружений, а также рекомендации по их конструкции.

Если на разведочном участке отсутствует водозаборное сооружение, то расчеты целесообразно продолжать в следующей последовательности:

а) для выбранной схемы водозабора производится расчет его общей производительности Q_2 при заданном понижении уровня, которое должно быть равным или менее допустимого его значения (т. е. для условий $S_{\text{рав}} \leq S_{\text{доп}}$);

б) определяется разница между значениями Q_1 (общая заявленная потребность в воде) и Q_2 (расчетная производительность проектируемого водозабора) для определения величины искусственного воспроизводства запасов Q_3 ;

в) завершаются исследования доказательством реальной возможности получить на водозаборе дополнительное искусственное питание подземных вод и рекомендациями по конструкции инфильтрационных сооружений.

7. После завершения всех расчетов производится подразделение эксплуатационных запасов подземных вод по категориям, по степени их достоверности и разведанности. В этом отношении необходимо руководствоваться требованиями действующей инструкции ГКЗ СССР.

Исключение из изложенных выше методических рекомендаций по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод предста-

влияют два типовых гидрогеологических условия, представленные в общей схеме формирования искусственного их воспроизводства.

При рассмотрении первого и четвертого типовых условий (см. табл. 1) расчеты по оценке эксплуатационных запасов подземных вод целесообразно производить одним приемом, путем непосредственного определения общей производительности водозаборного сооружения.

Для других типовых условий, которые характеризуются нецеленаправленным режимом искусственного формирования запасов, должна применяться обычная методика подсчета запасов, как при разведке естественных месторождений подземных вод.

Таким образом, по результатам разведки должны быть оценены эксплуатационные запасы подземных вод по различным категориям их достоверности, представлены необходимые исходные гидрогеологические данные и рекомендации для последующей стадии — проектирования водозаборного сооружения с учетом искусственного воспроизводства запасов и ресурсов подземных вод.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ПЕРВОГО ТИПА ИСКУССТВЕННОГО ПИТАНИЯ

Выше отмечалось, что для первого типа характерно направленное искусственное питание подземных вод, происходящее непосредственно в процессе эксплуатации водозаборного сооружения за счет береговой инфильтрации поверхностных вод рек, озер, водохранилищ (береговые водозаборы инфильтрационного типа).

Как показывает накопленный опыт, более 50% от общего количества подземных вод, используемых в СССР для нужд народного хозяйства, отбираются из недр с помощью водозаборов инфильтрационного типа.

Наибольшее распространение инфильтрационные водозаборы получили в долинах преимущественно малых рек с постоянно действующими поверхностными потоками. В гидрогеологическом отношении для них характерна тесная гидравлическая взаимосвязь подземных и поверхностных вод. В этих условиях формирование эксплуатационных запасов подземных вод происходит за счет так называемой «наведенной инфильтрации» (рис. 55).

Непременным условием для формирования искусственных запасов является принудительное понижение уровня грунтовых вод на линии водозабора ниже отметки уреза воды в реке или водоеме. Изменяя понижение уровня грунтовых вод на водозаборном участке, можно регулировать величину привлекаемых из реки искусственных ресурсов, так как всякое дополнительное понижение уровня грунтовых вод при относительно постоянной отметке уреза воды в реке (водоеме) ведет к увеличению гидравлического уклона, а следовательно, к возрастанию величины

берегового фильтра. При наличии активной формы взаимосвязи подземных и поверхностных вод в течение всего периода длительной эксплуатации водозабора может сохраниться подпертый режим фильтрации. Тогда урез воды в реке или водоеме может быть представлен в виде граничного условия первого рода, соответствующего контуру постоянного напора ($H = \text{const}$). Для того чтобы сохранить такие условия, при которых не будет происходить отрыва уровня подземных вод от подошвы слабопроницаемого слоя в русле реки (ложе водоема), понижение уровня на урезе воды должно приниматься не более определенной величины ($S \leq \leq h_0 + m_0$), где h_0 — глубина воды в реке — водоеме, m_0 — мощность слабопроницаемого слоя в русле реки — водоеме.

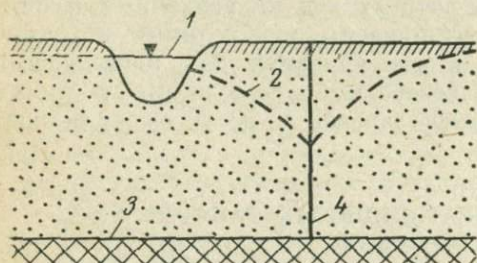


Рис. 55. Схема берегового водозабора инфильтрационного типа в виде линейного ряда скважин.

1 — уровень воды в реке; 2 — уровень грунтовых вод; 3 — подошва водоносного горизонта; 4 — эксплуатационная скважина

В практике искусственного восполнения запасов пресных подземных вод для поддержания напорных условий используются различные способы усиления береговой инфильтрации поверхностных вод. В качестве наиболее распространенных инженерно-технических мероприятий для этих целей применяется: периодическая расчистка русел рек и дна водоемов механическим или гидравлическим способом, рыхление донных отложений для улучшения их фильтрационных свойств и увеличения скорости инфильтрации; русловое регулирование поверхностного стока путем сооружения поперечных плотин, ограждающих дамб, водосливных порогов и других инженерных сооружений, обеспечивающих создание дополнительного подпора воды и расширение площади инфильтрации. Следует отметить, что снятие верхнего закольматированного слоя пород в русле реки (водоема) часто приводит к ухудшению качества и особенно бактериального состава подземных вод, если при этом поверхностные воды являются недостаточно чистыми. Поэтому такая расчистка обязательно должна сопровождаться определенными мерами предосторожности, усилением санитарно-гигиенического контроля за качеством поверхностных и подземных вод, а при необходимости — некоторым повышением дозы их хлорирования и другими профилактическими мероприятиями.

При работе инфильтрационного водозабора, расположенного параллельно берегу реки (водоема), может достаточно быстро наступить установившийся режим фильтрации подземных вод.

В этом случае формирование дебита каптажных сооружений в условиях подпертого режима фильтрации будет происходить почти целиком за счет постоянной береговой инфильтрации поверхностных вод.

Очень важным для оценки запасов подземных вод является выяснение условий возможного отрыва уровня грунтовых вод от русловых отложений реки (водоема), которое может произойти в процессе длительной эксплуатации. В связи с этим, прежде чем приступить к аналитическим расчетам, следует убедиться в том, что при длительной эксплуатации водозабора на изучаемом объекте сохранится подпертый режим фильтрации потока.

Эти рекомендации применимы главным образом для тех речных долин, в строении русловых отложений которых принимают участие двухслойные толщи пород.

Известно, что при движении жидкости через двухслойную толщу может произойти разрыв фильтрационного потока, если коэффициент фильтрации нижележащего продуктивного слоя будет больше, чем скорость инфильтрации через верхний слабопроницаемый слой, т. е. при $K > v_n$ (Ю. М. Шехтман, В. М. Григорьев). Такие геолого-гидрогеологические условия, как правило, могут наблюдаться при искусственном восполнении подземных вод на участках зарегулированных рек или вблизи водоемов, когда в верхней зоне пород может образоваться заиленный слой (закольматированная зона пород и илистый осадок), обладающий более низкими фильтрационными свойствами, чем нижележащая часть продуктивного водоносного горизонта. Необходимым условием для разрыва фильтрационного потока является неравенство (Ю. М. Шехтман)

$$K > K_0 \left(1 + \frac{h_0}{m_0} \right), \quad (XI.1)$$

где K_0 — коэффициент фильтрации слабопроницаемого заиленного слоя, м/сут.

Численный анализ соотношения (XI.1) показывает, что фильтрация воды в большинстве случаев должна происходить в условиях отрыва уровня от ложа реки (водоема). Например, если средняя глубина воды в реке $h_0 = 2$ м, мощность слабопроницаемого слоя $m_0 = 0,1$ м при коэффициенте фильтрации $K_0 = 0,5$ м/сут, то соотношение (XI.1) будет соблюдаться уже при значении коэффициента фильтрации нижележащих водоносных пород более 10 м/сут.

По В. М. Григорьеву, при относительно сильной заиленности русла реки (водоема) полный отрыв зеркала грунтовых вод от подошвы заиленного слоя будет иметь место, если коэффициент фильтрационного сопротивления $A_0 = K_0/m_0$ превысит некоторое значение критического сопротивления $A_{окр}$ ($A_0 > A_{окр}$).

Е. Л. Минкин (1973 г.), основываясь на решениях В. М. Григорьева, предложил следующее выражение для проверочного

расчета возможности полного отрыва уровня подземных вод от подошвы слабопроницаемого слоя в русле реки (водоеме)

$$A_0 \geq \frac{(H_0 - h) 4b (L_0 + b)}{K(2h - S) S - 2q_0 (L_0 + 2b)} \quad (XI.2)$$

где H_0 — превышение среднего уровня воды в реке (водоеме) над подошвой водоносного горизонта, м;

h — мощность водоносного горизонта под руслом реки, м;

b — половина ширины «водного зеркала» реки (водоема), м;

L_0 — расстояние линейного ряда от уреза реки, м;

S — понижение уровня в скважинах водозабора;

q_0 — расход равноприточной галереи, эквивалентной по производительности линейному водозабору.

Значение q_0 может быть определено с учетом решения, предложенного Ф. М. Бочевеком (1968), по формуле

$$q_0 = \frac{KS(2h - S)}{lR} \quad (XI.3)$$

где $R = f(at/l^2; 2B/l)$ — гидравлическое сопротивление, величина которого находится по графикам рис. 56, построенным для различных значений соотношения $2B/l$ способом сложения течений для весьма большого числа отображений (Е. Л. Минкин, 1973 г.).

Исходя из соотношения удельного расхода по пласту в сторону водозабора (дрены) и удельного фильтрационного расхода, поступающего из реки (водоема) при «дождевании», проверочный расчет на возможность полного отрыва от подошвы слабопроницаемого слоя может также выполняться по упрощенной формуле

$$\frac{K(2h - S)SA_0}{4b(L_0 + 2b)} \geq (H_0 - h) \quad (XI.4)$$

где правая часть неравенства $(H_0 - h) = h_0 + m_0$ представляет собой критическую величину понижения уровня, определяемую фактической глубиной воды в реке h_0 и мощностью слабопроницаемого слоя m_0 .

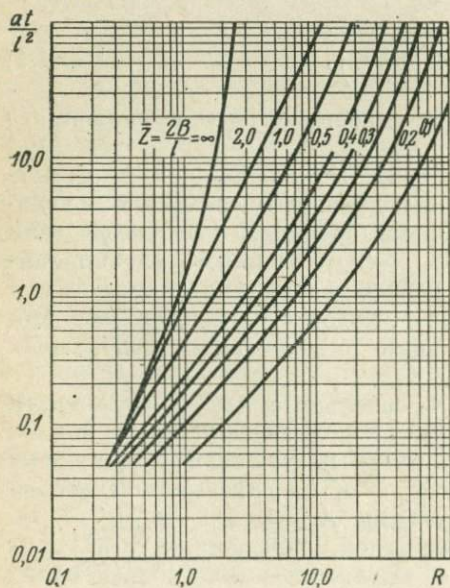


Рис. 56. Графики для определения безразмерного гидравлического сопротивления $R = f\left(\frac{at}{l^2}; \frac{2B}{l}\right)$

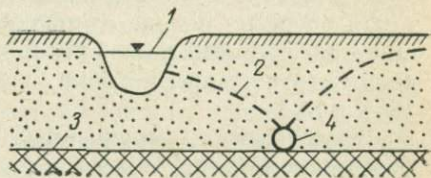
На участках действующих инфильтрационных водозаборов наличие отрыва уровня подземных вод от подошвы слабопроницаемого слоя может быть установлено по данным наблюдений за режимом подземных вод по створу наблюдательных скважин, расположенному между водозабором и рекой нормально к ним. При этом одна из наблюдательных скважин закладывается вблизи уреза воды с ближайшей к водозабору стороны реки, а другая — на противоположной стороне.

После такой предварительной проверки можно приступить непосредственно к оценке разведанных запасов подземных вод.

Если в результате разведки или контрольных расчетов будет доказано формирование на водозаборном участке режима под-

Рис. 57. Схема берегового водозабора инфильтрационного типа в виде горизонтальной галереи.

1 — уровень воды в реке; 2 — уровень грунтовых вод; 3 — подошва водоносного горизонта; 4 — горизонтальная водозаборная галерея



пертой фильтрации потока, то реку, канал или водоем можно рассматривать как границы с постоянным напором ($H = \text{const}$).

Наблюдения на действующих системах искусственного выполнения подземных вод показывают, что такой режим может иметь место при фильтрации поверхностных вод весьма малой мутности через высокопроницаемые породы (например, гравийно-галечниковые отложения), а также при соблюдении условия, при котором понижение уровня подземных вод на отметках воды в реке и бассейнах не превышает глубины их наполнения.

Как следует из общей теории разведки подземных вод, оценка эксплуатационных запасов на локальных участках сводится в конечном счете к предварительному расчету дебита водозаборного сооружения, наиболее рационального для данных конкретных условий.

Если водоносный горизонт на разведочном участке имеет сравнительно небольшую мощность (5—10 м), то в качестве водозаборного сооружения целесообразно принять горизонтальную галерею (рис. 57). Односторонний приток из реки или канала в горизонтальную совершенную галерею может быть определен по формуле

$$Q_n = \frac{2kmSl}{L_0 + \Delta L}, \quad (\text{XI.5})$$

где l — половина длины водозабора (горизонтальной галереи), м;
 L_0 — истинное расстояние от водозабора до реки (канала), м;
 ΔL — линейное гидравлическое сопротивление русловых отложений в ложе реки, м;

km — коэффициент водопроводимости пласта, м²/сут;

S — понижение уровня, м.

В формуле (XI.5) и в последующих расчетных зависимостях в условиях при переходе от напорных вод к безнапорным необходимо m заменить через $(h - S/2)$.

Выше неоднократно подчеркивалось, что русловые отложения реки и естественные водоемы (озера, водохранилища) обладают фильтрационным сопротивлением, связанным с несовершенством их вреза в водоносный горизонт, неоднородностью фильтрационных свойств пород в вертикальном и горизонтальном направлениях, с наличием в донной части водоема или русле заиленного слоя с иными, чем в водоносном горизонте, фильтрационными свойствами и др. При оценке эксплуатационных запасов это обстоятельство должно учитываться путем условного смещения контуров постоянного напора от линии водозабора на величину ΔL , равную такому отрезку потока однородного водоносного пласта, фильтрационное сопротивление которого эквивалентно сопротивлению донных отложений водоема, канала или реки (Шестаков В. М., 1964 г.).

Исследования, выполненные В. М. Шестаковым и Ю. О. Зеегофером, показали, что метод дополнительного (эквивалентного) слоя дает погрешность не более 20% по сравнению с более строгим решением при условии, если $\Delta L \leq 7L_0$. Так как расстояние от инфильтрационных водозаборов до реки обычно составляет 100—200 м, то максимальные значения ΔL , при которых еще допустимо применение метода эквивалентного слоя, не должны превышать соответственно 700 и 1400 м.

Опыт оценки эксплуатационных запасов подземных вод в речных долинах СССР показывает, что в зависимости от условий взаимосвязи поверхностных и подземных вод, наличия или отсутствия между руслом реки и водоносным горизонтом слабопроницаемых глинистых отложений параметр ΔL может принимать следующие примерные значения (Б. В. Боровский, Л. С. Язвин, 1971 г.):

- а) для водоносных горизонтов, прорезаемых рекой и сложенных трещиноватыми и закарстованными породами, 50—100 м;
- б) для водоносных горизонтов, сложенных песчано-гравийно-галечниковыми отложениями, 150—200 м;
- в) для водоносных горизонтов, отделенных от реки слабопроницаемым слоем или другим водоносным горизонтом с низкими фильтрационными свойствами, 400—500 м.

Эти рекомендации могут быть использованы при предварительной оценке эксплуатационных запасов подземных вод.

Таким образом, реальные условия взаимосвязи поверхностных и подземных вод в большинстве случаев позволяют применять в расчетах водозаборов инфильтрационного типа метод дополнительного (эквивалентного) слоя. Следует иметь в виду, что при прочих равных условиях значение ΔL бывает большим в долинах с зарегулированным поверхностным стоком, для которых характерно усиление процессов коагуляции и заиления донных отложений,

особенно при интенсивной эксплуатации водозаборов. Например, такие условия наблюдаются на ряде инфильтрационных водозаборов в ГДР, ФРГ и Швейцарии (Löffler, Pietsch, Huhn, 1973; Trüb, 1974), где вследствие роста и уплотнения заиленных донных осадков, в общем балансе водозаборов сокращается доля «берегового фильтра». Для речных долин с незарегулированным стоком в результате донной и боковой эрозии при прохождении паводков происходит в естественных условиях декольматация русловых отложений, при этом значения ΔL могут изменяться в течение года. Это обстоятельство подтверждено неоднократным определением величин ΔL в предпаводковый и послепаводковый периоды в долинах Центрального Казахстана, а также на горных реках Черноморского побережья СССР, имеющих в целом достаточно тесную связь поверхностных и подземных вод.

При переходе от горизонтальной галереи к оценке дебита линейного ряда совершенных равнодебитных скважин необходимо учитывать гидродинамическое несовершенство водозабора, которое, по предложению В. М. Шестакова (1973), может быть выражено в виде эквивалентной длины потока $L_{кс}$. При подпертом режиме фильтрации для линейного ряда скважин неограниченной длины оценка эксплуатационных запасов подземных вод может производиться по формуле

$$Q_n = \frac{2lkmS}{L_p + L_{кс}}, \quad (XI.6)$$

где $L_p = L_0 + \Delta L$ — приведенное расстояние от водозабора до реки с учетом гидравлического сопротивления русла реки ΔL ;

$$L_{кс} = \frac{\sigma}{2\pi} \ln \frac{\sigma}{2\pi r_0}, \quad (XI.7)$$

σ — расстояние между эксплуатационными скважинами, м
 r_0 — радиус скважин, м.

Для ряда скважин ограниченной длины, при условии $2L_0/l > 0,5$ расчеты по формуле (XI.6) дают заметное занижение возможного дебита водозабора. В этом случае для оценки эксплуатационных запасов в условиях совершенной связи подземных и поверхностных вод и небольшой длине ряда скважин необходимо пользоваться решением, полученным В. М. Шестаковым

$$Q = \frac{2lkmS}{\ln \sqrt{1 + \left(\frac{2L_p}{l}\right)^2} + \frac{2L_p}{l} \operatorname{arctg} \frac{l}{2L_p} + \frac{1}{N} \ln \frac{\sigma}{2\pi r_0}}. \quad (XI.8)$$

Если принять типовое расстояние от водозабора до реки $L_0 = 100-200$ м, то длина водозабора $2l$, при которой погрешность в расчетах является допустимой, должна быть не менее $800-1600$ м.

Таким образом, анализируя полученные гидродинамические зависимости, можно прийти к выводу о том, что для оценки эксплу-

атационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением в рассматриваемых условиях помимо водопроницаемости эксплуатационного водоносного горизонта необходимо изучить по данным опытно-фильтрационных работ и режимных наблюдений два основных параметра, количественно отражающих степень взаимосвязи поверхностных и подземных вод, — коэффициент фильтрационного сопротивления и гидравлическое сопротивление русла реки.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ВТОРОГО ТИПА ИСКУССТВЕННОГО ПИТАНИЯ

Как следует из табл. 1, для типовых условий, отнесенных ко второй группе, искусственное питание на действующем (на разведываемом) водозаборе происходит путем инфильтрации поверхностных вод из специальных сооружений (главным образом при двухстороннем питании).

Если в районе изучаемого объекта имеется надежный источник поверхностных вод необходимого качества и благоприятные гидрогеологические условия, то на разведочном участке искусственное восполнение подземных вод можно организовать с помощью системы открытых инфильтрационных сооружений с тем, чтобы обеспечить необходимую потребность в воде на неограниченный срок эксплуатации.

Оценку эксплуатационных запасов подземных вод в данных условиях можно выполнить по двум основным вариантам (Сычев, 1975). По первому варианту общая площадь искусственной инфильтрации поверхностных вод и количество инфильтрационных бассейнов можно определить заранее. Это определение можно выполнить, исходя из заданного общего дебита сооружений, наличия на разведочном участке свободной площади для размещения инфильтрационных сооружений, благоприятных геоморфологических условий и др. Таким образом, по первому варианту необходимо определить возможный дебит водозабора с учетом намечаемой системы искусственного питания (производительности инфильтрационных сооружений).

По второму варианту оценку эксплуатационных запасов подземных вод можно выполнить в следующей последовательности. Исходя из общей заявленной потребности в воде, задается дебит вновь проектируемого или действующего (с учетом его реконструкции) каптажного сооружения, который необходимо обеспечить с помощью дополнительного искусственного питания эксплуатационных запасов подземных вод.

В связи с этим аналитическими расчетами необходимо определить требуемый расход искусственной инфильтрации, общую площадь инфильтрационных сооружений (количество инфильтра-

ционных бассейнов, их примерные размеры, рациональную схему их расположения на разведочном участке и др.).

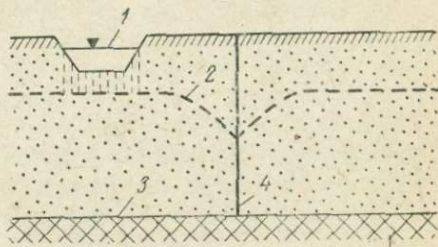
Оценка эксплуатационных запасов подземных вод по указанным вариантам может выполняться применительно к двум, чаще всего встречающимся гидрогеологическим условиям (рис. 58):

а) для пласта, не ограниченного в плане; когда водозаборное сооружение располагается в виде линейного ряда скважин и параллельно ему располагается ряд инфильтрационных бассейнов для искусственного питания;

б) инфильтрационный водозабор аналогичного типа (линейный ряд скважин) пласта, не ограниченного в плане, расположен

Рис. 58. Схема искусственного восполнения запасов подземных вод с помощью одного ряда инфильтрационных бассейнов.

1 — уровень воды в бассейне; 2 — уровень грунтовых вод; 3 — подошва водоносного горизонта; 4 — эксплуатационная скважина



между рекой и рядом инфильтрационных бассейнов или между двумя рядами инфильтрационных бассейнов.

При наличии в районе постоянно действующего источника питания наиболее эффективным является применение непрерывного режима искусственного восполнения. При этом режиме предполагается, что из общего числа инфильтрационных бассейнов только часть их (обычно не более 20%) последовательно отключается на чистку или ремонт, а остальная часть находится в постоянной работе.

Решающее значение для схематизации граничных условий участка водозабора имеет установление характера фильтрации воды из рек и инфильтрационных бассейнов, а именно: подпертого, т. е. при постоянном напоре ($H = \text{const}$) или свободного (в виде дождевания) с условно постоянным (средним) расходом ($Q = \text{const}$). Как отмечалось ранее, для доказательства этого положения расчетами проверяется возможность полного отрыва уровня грунтовых вод от подошвы слабопроницаемого слоя в русле реки или бассейне.

Опыт эксплуатации действующих систем искусственного восполнения подземных вод показывает, что формирование в донной части инфильтрационных бассейнов слабопроницаемого слоя чаще всего приводит к изменению характера взаимосвязи подземных и поверхностных вод и к режиму свободной фильтрации из бассейнов. В этих условиях, как показано В. М. Шестаковым (1973), инфильтрационный поток из ряда бассейнов (реки, канала) можно представить в виде линейного стока с единичным расходом, равно-

мерно распределенным по длине в середине реки или бассейна.

Величина единичного расхода свободной фильтрации из реки или канала определяется как произведение ширины их водного зеркала на среднюю скорость инфильтрации, т. е.:

$$q_p = 2b_p v_p \text{ и } q_k = 2b_k v_k, \quad (\text{XI.9})$$

где $2b_p$ и $2b_k$ — ширина реки в русловой части и инфильтрационного бассейна;

v_k — скорость инфильтрации из реки и из инфильтрационного бассейна.

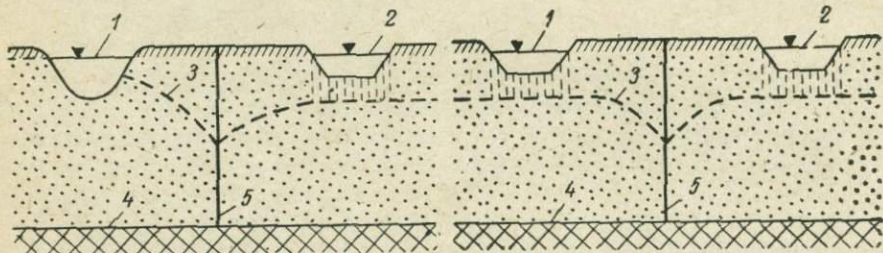


Рис. 59. Схема формирования эксплуатационных запасов подземных вод при фильтрации из реки и ряда инфильтрационных бассейнов.

1 — уровень воды в реке; 2 — уровень воды в бассейне; 3 — уровень грунтовых вод; 4 — подошва водоносного горизонта; 5 — эксплуатационная скважина

Рис. 60. Схема искусственного восполнения запасов подземных вод с помощью двух рядов инфильтрационных бассейнов (двухстороннее питание).

1, 2 — уровень воды в инфильтрационном бассейне; 3 — уровень грунтовых вод; 4 — подошва водоносного горизонта; 5 — эксплуатационная скважина

Для линейного ряда инфильтрационных бассейнов, имеющих общую протяженность λ , меньшую, чем длина водозаборного ряда $2l$, при расчете единичного расхода должен учитываться поправочный коэффициент $\lambda/2l$, т. е.

$$q_6 = 2b_6 v_n \frac{\lambda}{2l}, \quad (\text{XI.10})$$

где $2b_6$ — средняя ширина инфильтрационного бассейна;

v_n — средняя скорость инфильтрации из бассейна;

$\lambda = \sum l_6$ — длина всех инфильтрационных бассейнов.

В формулы (XI.9) и (XI.10) входит один из основных гидрогеологических параметров, необходимых для расчетов эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного питания, — средняя скорость инфильтрации из бассейнов (поверхностных сооружений). Этот параметр определяется опытно-фильтрационными полевыми исследованиями, на основе которых прогнозируется значение v_n за период одного рабочего фильтрационного цикла.

Методика определения средней скорости инфильтрации приведена в специальной главе настоящей работы.

В соответствии с общими природными условиями и принятыми системами искусственной инфильтрации возможны четыре схемы граничных условий участков водозаборов, представленные на рис. 59, 60.

Рассмотрим наиболее общий случай искусственного восполнения запасов подземных вод, когда в пласте не ограниченных размеров в плане работает водозабор в виде горизонтальной совершенной дрены и линейный контур инфильтрационных сооружений (канал, ряд бассейнов) в виде поглощающей галереи. В этом случае, чтобы оценить дебит водозабора, обеспеченный только за счет искусственной инфильтрации, понижение уровня воды по линии водозабора S_0 следует компенсировать его подъемом Δh от влияния искусственного восполнения. Таким образом, для того чтобы не было истощения запасов в результате их непрерывной сработки, должно соблюдаться условие $S_0 = \Delta h$.

Для режима неустановившейся фильтрации подземных вод в плоском потоке понижение уровня на линии водозаборной дрены можно определить по уравнению

$$S_0 = \frac{q_n}{km} \frac{\sqrt{at}}{\sqrt{\pi}}, \quad (\text{XI.11})$$

где q_n — единичный расход водозаборной дрены, м³/сут на 1 м длины;

a — коэффициент уровнепроводности пласта, м²/сут;

km — водопроводимость пласта, м²/сут;

t — время эксплуатации, сут.

В свою очередь, повышение уровня за счет искусственного восполнения, в соответствии с решениями А. В. Лыкова (1967 г.), составит

$$\Delta h = \frac{q_n}{km} \sqrt{at} \, i \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right), \quad (\text{XI.12})$$

где q_n — единичный расход системы искусственного восполнения;

a — коэффициент уровнепроводности, м²/сут;

x — расстояние от водозабора, до середины инфильтрационных сооружений, м;

t — продолжительность непрерывной инфильтрации, сут;

$i \operatorname{erfc} (x/2\sqrt{at})$ — специальная функция, определяемая по таблицам (Бочеве, 1968).

При $S_0 = \Delta h$ в формулах (XI.11) и (XI.12) получим зависимость для оценки единичного дебита водозабора, обеспеченного лишь искусственным пополнением запасов подземных вод

$$q_n = q_n \sqrt{\pi} \, i \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right), \quad (\text{XI.13})$$

где коэффициент использования искусственных ресурсов подземных вод α составит

$$\alpha = \sqrt{\pi} i \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right). \quad (\text{XI.14})$$

В практике гидродинамических расчетов значения $2\sqrt{at}/\sqrt{\pi}$ и $2\sqrt{at} i \operatorname{erfc} (x/2\sqrt{at})$ в формулах (XI.11) и (XI.12) принято выражать в виде условных радиусов действия в плоском потоке водозабора

$$L_B = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{at} = 1,128 \sqrt{at} \quad (\text{XI.15})$$

и линейного ряда инфильтрационных бассейнов

$$L_G = 2 \sqrt{at} i \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right). \quad (\text{XI.16})$$

С учетом приведенных соображений значение единичного расхода водозабора при восполнении подземных вод с помощью инфильтрационных бассейнов будет равно

$$q_B = q_G \frac{L_G}{L_B}. \quad (\text{XI.17})$$

Отсюда величина коэффициента эффективности искусственного восполнения запасов подземных вод

$$\alpha = \frac{L_G}{L_B}. \quad (\text{XI.18})$$

Полный дебит водозабора Q_B при его длине $2l$ составит

$$Q_B = \frac{2l q_G L_G}{L_B}. \quad (\text{XI.19})$$

Аналогичным образом с использованием метода сложения фильтрационных течений получены расчетные гидродинамические зависимости для оценки производительности линейного ряда взаимодействующих скважин, питание которого осуществляется из специальных систем искусственного восполнения с различным характером взаимосвязи подземных и поверхностных вод (см. табл. 1). В качестве систем инфильтрационных сооружений и граничных условий рассмотрены одно- и двухстороннее питание из линейных рядов инфильтрационных бассейнов при режиме свободной фильтрации (дождевания); двухстороннее питание при разнородных границах, когда река может быть схематизирована как контур постоянного напора, а ряд бассейнов представлены в виде полосы дождевания: двухстороннее питание из двух параллельных контуров постоянного напора (река и ряд инфильтрационных бассейнов или два параллельных ряда инфильтрационных бассейнов). Каждому типу граничных условий и систем искусственной инфильтрации соответствуют свои значения коэффициента эффективности искус-

ственного восполнения, определяемые по приведенным ниже формулам (XI.24), (XI.25), (XI.26) и (XI.27).

Таким образом, оценка эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением по первому варианту расчетов должна производиться в следующей последовательности:

1) по данным буровых работ и опытно-фильтрационных исследований (откачек из скважин и наливов в опытные бассейны) обосновываются выбор средних значений гидрогеологических расчетных параметров: водопроницаемость пласта km , уровнепроницаемость a , гидравлическое сопротивление русла реки ΔL и средняя годовая скорость инфильтрации воды из бассейнов v_n ;

2) исходя из рекомендаций по проектированию систем искусственного восполнения и местных условий участка водозабора, задаются количеством инфильтрационных бассейнов и их размерами (длиной l_6 и шириной $2b_6$);

3) с учетом конструктивных особенностей действующего или намечаемого водозабора (расстояние между скважинами σ и их радиус r_0) рассчитывается показатель гидродинамического несовершенства водозабора $L_{кс}$;

4) с использованием гидрогеологических параметров v_n и a , размеров инфильтрационных бассейнов (l_6 , $2b_6$) и общей длины водозабора $2l$ определяются значения единичного расхода искусственной инфильтрации q_6 , приведенные радиусы действия водозабора $L_в$, системы искусственного восполнения L_0 и расстояние от водозабора до реки L_p с учетом ее гидравлического сопротивления ΔL ;

5) по соответствующим формулам, отвечающим граничным условиям фильтрационного потока, оценивается дебит водозабора в условиях искусственного питания, при этом для случаев, отвечающих расчетным зависимостям (XI.22) и (XI.23), учитывается величина допустимого понижения уровня подземных вод S .

Методику гидродинамических расчетов для оценки эксплуатационных запасов подземных вод с системой искусственного их воспроизводства по второму варианту рассмотрим на конкретном примере.

На участке действующего водозабора производительностью 30 тыс. м³/сут, обеспеченной естественными ресурсами подземных вод, по результатам разведочных гидрогеологических работ проектируется система искусственного восполнения запасов с целью увеличения общего расхода водозабора до 80 тыс. м³/сут, согласно заявленной потребности в воде объекта водоснабжения. Таким образом, дополнительный дебит водозабора за счет искусственного восполнения подземных вод должен составить $Q_{ин} = 50$ тыс. м³/сут.

Как показали проведенные исследования, существующий водозабор, состоящий из 20 эксплуатационных скважин ($N = 20$), при среднем расстоянии между скважинами $\sigma = 100$ м имеет длину $\sigma N = 2000$. Дебит одной скважины равен 1,5 тыс. м³/сут.

Гидрогеологические параметры продуктивного водоносного горизонта следующие: мощность горизонта $H = 20$ м, коэффициент фильтрации $K = 50$ м/сут, коэффициент уводнепроводности $a = 5000$ м²/сут.

Требуется определить необходимые размеры инфильтрационных бассейнов, если намечается непрерывный режим искусственного восполнения подземных вод, а средняя скорость инфильтрации, определенная опытными исследованиями и прогнозными расчетами, составляет 1,2 м/сут. Расстояние от линии инфильтрационных бассейнов до водозабора принимается равным 100 м ($x_0 = 100$ м). Допустимое понижение уровня подземных вод в скважинах водозабора примем равным половине мощности водоносного горизонта или 10 м ($S_{\text{доп}} = 10$ м).

Возможный дебит одной скважины в условиях одностороннего восполнения подземных вод определяется приближенно по известной формуле Маскета — Лейбензона

$$Q_c = \frac{2\pi kmS}{\ln \frac{\sigma}{2\pi r_0} + \frac{2\pi x_0}{\sigma}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10}{2,3 \ln \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,2} + \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 100}{100}} = 4400 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Здесь

$$m = H - \frac{S}{2} = 20 - \frac{10}{2} = 15 \text{ м.}$$

На основании предварительных расчетов принимается дебит одной скважины на водозаборном участке при искусственном восполнении подземных вод, равным 4 тыс. м³/сут. Следовательно, для получения расхода водозабора 80 тыс. м³/сут будет достаточно имеющегося количества скважин (20), однако потребуется их переоборудование более производительными насосами. Для условий непрерывного режима искусственного восполнения подземных вод определяется величина единичного расхода искусственной инфильтрации $q_б$. Часть единичного расхода водозабора, которая будет обеспечиваться только за счет искусственного пополнения, составит

$$q_{\text{ви}} = \frac{Q_{\text{ви}}}{\sigma N} = \frac{50000}{100 \cdot 20} = 25 \text{ м}^3/\text{сут на 1 м длины водозабора.}$$

Далее по формулам (XI.15), (XI.16), (XI.19) определяют L_b , L_G и $L_{\text{кс}}$, при этом продолжительность непрерывной инфильтрации из бассейнов $t = 10^4$ сут.

$$L_b = 1,128 \sqrt{5000 \cdot 10^4} = 7910 \text{ м,}$$

$$L_G = 2 \sqrt{5000 \cdot 10^4} i \operatorname{erfc} \left(\frac{100}{2 \sqrt{5000 \cdot 10^4}} \right) = 2 \cdot 7071 i \operatorname{erfc} (0,014) = 7778 \text{ м,}$$

$$L_{\text{кс}} = \frac{100}{2 \cdot 3,14} 2,3 \lg \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,2} = 70 \text{ м.}$$

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод при одно- или двухстороннем питании
из специальных инфильтрационных сооружений

Водозабор, система искусственного восполнения и граничные условия	Расчетные зависимости для определения	
	дебита водозабора, обеспеченного искусственным питанием	коэффициента эффективности искусственного восполнения
Линейный ряд скважин и ряд инфильтрационных бассейнов или канал (одна полоса дождевания)	$Q_{в} = \frac{2lq_6L_6}{L_{в} + 2L_{кс}} \quad (XI.20)$	$\alpha_{н} = \frac{L_6}{L_{в} + 2L_{кс}} \quad (XI.24)$
Линейный ряд скважин между двумя рядами инфильтрационных бассейнов (две полосы дождевания)	$Q_{в} = \frac{2l(q_{61}L_{61} + q_{62}L_{62})}{L_{в} + 2L_{кс}} \quad (XI.24)$	$\alpha_{н1} = \frac{L_{61}}{L_{в} + 2L_{кс}} \quad (XI.25)$ $\alpha_{н2} = \frac{L_{62}}{L_{в} + 2L_{кс}}$
Линейный ряд скважин между рекой (контура постоянного напора) и рядом инфильтрационных бассейнов (полоса дождевания)	$Q_{в} = \frac{l(2kmS + q_6L_6)}{L_p + L_{кс}} \quad (XI.22)$	$\alpha_{н} = \frac{L_6}{2(L_p + L_{кс})} \quad (XI.26)$ при $L_6 \leq 2L_p$
Линейный ряд скважин между рекой и рядом инфильтрационных бассейнов (два контура постоянного напора)	$Q_{в} = \frac{2lkmS}{\frac{L_1L_2}{L_1 + L_2} + L_{кс}} \quad (XI.23)$	$\alpha_{н} = \frac{L_1L_2}{L_1L_2 + (L_1 + L_2)L_{кс}} \quad (XI.27)$ $L_1 = L_{01} + \Delta L_1, \quad L_2 = L_{02} + \Delta L_2$

Тогда

$$q_6 = q_v \frac{L_n + L_{кс}}{L_6} = 25 \frac{7910 + 2,70}{7778} = 25,9 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Затем определяют требуемую общую площадь искусственной инфильтрации

$$F = \frac{q_6 \sigma N}{v_n} = \frac{25,9 \cdot 100 \cdot 20}{1,2} = 43\,167 \text{ м}^2.$$

Длина одного бассейна принимается 180 м, расстояние между бассейнами — 20 м. Тогда для обеспечения требуемого расхода на участке водозабора общей протяженностью 2000 м можно разместить 10 инфильтрационных бассейнов. Примем, что из общего числа сооружений одновременно в чистке будет находиться по 2 бассейна, а остальные 8 — в постоянной работе. Тогда средняя ширина бассейнов

$$2b_6 = \frac{F}{l_6 (N-2)} = \frac{43\,167}{1440} = 30 \text{ м.}$$

Таким образом, для получения дополнительного дебита водозабора в количестве 50 тыс. м³/сут путем искусственного восполнения подземных вод необходимая ширина инфильтрационных бассейнов должна быть равной 30 м.

Так как в расчетах величина понижения уровня в водозаборных сооружениях принята менее допустимой и основные гидрогеологические параметры инфильтрационных бассейнов определены опытным путем, общую оценку эксплуатационных запасов подземных вод в данном конкретном случае можно считать достоверной.

Расчетный дебит водозаборных скважин, подтвержденный опытными работами в естественном их питании, можно отнести к запасам по категории А. Дебит с учетом дополнительного искусственного питания со стороны непрерывно действующих инфильтрационных бассейнов можно квалифицировать как запасы, по степени достоверности отвечающие категории В.

Расчетные зависимости для оценки эксплуатационных запасов подземных вод в различных граничных условиях искусственного их питания приведены в табл. 13.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ТРЕТЬЕГО ТИПА ИСКУССТВЕННОГО ПИТАНИЯ

Третий тип характеризуется тем, что искусственное питание подземных вод на объекте происходит в речных долинах путем площадной инфильтрации поверхностных вод при периодическом затоплении поверхности пойменной террасы. При этом в сравнительно мощной толще водопроницаемых пород накапливаются

емкостные запасы подземных вод, постоянный отбор которых позволяет регулировать их периодическое возобновление.

Благоприятные геолого-гидрогеологические и гидрологические условия для искусственного формирования подобного типа емкостных запасов подземных вод чаще всего встречаются в долинах рек второго и третьего порядка в аридной зоне СССР (Средней Азии, Казахстане, Юге РСФСР и Украине). Как показали поисково-разведочные работы последних лет, такие благоприятные условия могут быть обнаружены и в области распространения многолетней мерзлоты — на севере и северо-востоке нашей страны.

Значительное число малых рек в указанных районах нашей страны обладает резкой изменчивостью режима поверхностного стока по сезонам года и в многолетнем разрезе. Для долин рек с периодически действующим стоком характерно то, что в засушливые, маловодные годы или в зимнее время года поверхностный сток в них практически отсутствует или величина его несоизмеримо мала по сравнению с намечаемым отбором подземных вод для водоснабжения того или иного объекта.

Например, в центральных районах Казахстана основное количество поверхностного стока (до 90—95%) проходит весной после снеготаяния во время бурного короткого паводка. Для этих районов Казахстана, по данным продолжительных гидрологических наблюдений, выделяются определенные ритмы в чередовании маловодных и многоводных периодов (5—9 лет), обусловленные ритмичными изменениями климата. В связи с этим восполнение ранее сработанных запасов грунтовых вод аллювиальных отложений за счет инфильтрации паводкового стока происходит периодически. Вслед за циклом маловодных засушливых лет, когда питание за счет поверхностного стока весьма незначительно, наступает период лет средней и высокой водности, в течение которого грунтовые воды при постоянном их отборе могут получить существенное восполнение своих запасов за счет площадной инфильтрации поверхностных вод в результате затопления (заливания) пониженных участков долин или площадей депрессионных воронок действующих водозаборов. Интенсивный отбор подземных вод в таких условиях обеспечивается в начальный период эксплуатации за счет извлечения естественных запасов в период отсутствия стока с последующим искусственным их накоплением, путем регулирования с помощью простейших сооружений распределения паводковых вод в многоводные годы.

В последние годы в СССР выявлены подобные условия и в области распространения вечной мерзлоты. В долинах рек второго и третьего порядков поверхностный сток в зимнее время полностью промерзает. Определенную часть года (4—6 месяцев) при эксплуатации водозабора подпитывания речными водами не происходит. Весьма важно в таких долинах установить продолжительность периода отсутствия поверхностного стока. Этим и опре-

делается срок возможной сработки естественных запасов с последующим их искусственным восполнением.

По характеру взаимосвязи поверхностных и подземных вод долины рек с периодически действующим стоком можно подразделить на две основные группы. К долинам первой группы можно отнести речные долины так называемого казахстанского типа: например, долины рек Нура, Шерубайнура, Токрау, Сарысу, грунтовые воды которых имеют непосредственную гидравлическую связь с поверхностными водами временных водотоков. Эти речные

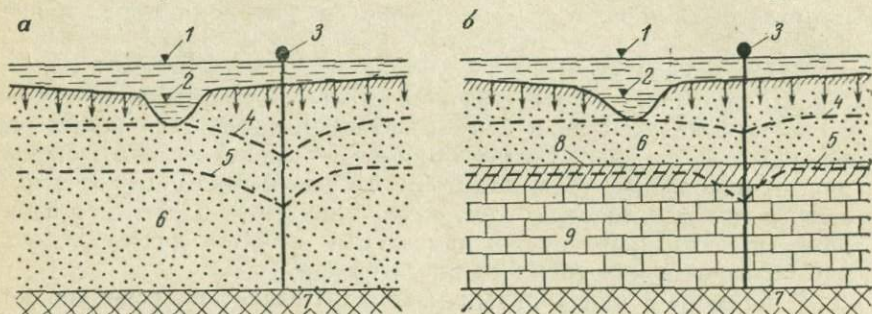


Рис. 61. Схема искусственного восполнения подземных вод при площадной инфильтрации с периодическим затоплением в весенний период:

а — при однослойном строении водоносной толщи; б — при двухслойном строении водоносной толщи. 1 — максимальный уровень поверхностных вод в период затопления; 2 — минимальный уровень воды в реке; 3 — эксплуатационная скважина; 4 — уровень подземных вод при восполнении; 5 — уровень подземных вод при максимальной сработке запасов; 6 — водоносный горизонт песчаных отложений; 7 — подошва водоносного горизонта; 8 — слабопроницаемый разделяющий слой; 9 — водоносный горизонт в карбонатных породах

долины на значительных площадях сложены с поверхности высокопроницаемыми песчано-гравийно-галечниковыми отложениями, местами перекрытыми покровными супесчано-суглинистыми образованиями мощностью 1—2 м. Геолого-гидрогеологические условия долин рассматриваемого типа могут схематизироваться при оценке искусственного восполнения запасов подземных вод как однослойная водоносная толща (рис. 61).

На территории Украины, Молдавии и других районов СССР в строении речных долин принимает участие двухслойная водоносная толща, разделенная слабопроницаемым прослоем — второй тип долин. К этому типу можно отнести, например, долины рек Северного Донца и Днестра. В этих долинах эксплуатируются подземные воды мергельно-мелового водоносного горизонта, кровля которого представлена слабопроницаемой зоной (так называемой зоной цементации), а выше залегают аллювиальные песчаные отложения. Граничные условия этих долин в вертикальном разрезе могут быть представлены в виде двухслойной толщи с изменяющимся уровнем в верхнем слое. При периодическом режиме искусственного восполнения запасов подземных вод с помощью затопления или устройства временных бассейнов

облегченного типа дебит таких водозаборов обеспечивается за счет перетекания срабатываемых естественных запасов подземных вод верхнего водоносного слоя с последующим восполнением грунтовых вод в период искусственной инфильтрации.

В условиях севера и северо-востока на площади развития многолетнемерзлых пород речные долины чаще всего имеют однослойное строение. Современные террасовые поверхности долин выполнены песчано-галечниковыми отложениями. Грунтовые воды в них, как правило, имеют тесную гидравлическую связь с поверхностными водами. В некоторых речных долинах формируются таликовые зоны.

Оценку эксплуатационных запасов подземных вод в рассмотренных геолого-гидрогеологических условиях рекомендуется производить по методике, аналогичной расчетам водозаборов, сооружаемых в долинах рек с периодическим стоком. При этом по данным многолетних гидрологических наблюдений надлежит предварительно определить максимальную продолжительность периода, в течение которого будет отсутствовать искусственное восполнение, и обосновать расчетный срок сработки емкостных запасов подземных вод. Затем по уравнениям неустановившегося режима фильтрации с учетом граничных условий пласта конкретного объекта определяется дебит водозабора, обеспеченный извлечением накопленных в горизонте искусственных запасов.

Водозаборы такого типа часто закладываются в речных долинах, борта которых сложены практически водонепроницаемыми породами. В речных долинах ограниченной ширины при соблюдении неравенства $t \geq 0,5B^2/a$ влиянием условно непроницаемых границ пласта уже нельзя пренебречь (B — ширина пласта полосы, м; t — длительность периода сработки запасов, сут).

При продольном расположении линейного ряда скважин в пласте-полосе (по оси долины) для оценки эксплуатационных запасов подземных вод может применяться известная формула Маскета

$$Q_v = \frac{2\pi kmSN}{\ln \frac{R_k}{r_0} + \frac{2at}{R_k^2} - 0,75}, \quad (XI.28)$$

где R_k — радиус блока, приведенного к круговому непроницаемому контуру, м;

r_0 — радиус скважины, м;

a — коэффициент уровнепроводности, м²/сут;

t — время эксплуатации, сут;

km — коэффициент проводимости пласта, м²/сут;

S — понижение уровня, м;

N — количество эксплуатационных скважин, шт.

В этом случае в расчетах можно принять, что каждая скважина продольного ряда срабатывает емкостные запасы подземных вод как бы в закрытом блоке питания, ограниченном контурами

выклинивания пласта и условными границами, проведенными через середины расстояний между скважинами σ .

Приведение расчетных прямоугольных блоков водоносного пласта площадью $B\sigma$ к круговым блокам с радиусом R_k допустимо, если $B \leq 4\sigma$. Приведенный радиус блока питания одной скважины определяется при этом по формуле

$$R_k = \sqrt{\frac{B\sigma}{\pi}}. \quad (\text{XI.29})$$

Дебит водозаборов, заложенных в пласте-полосе в виде нескольких поперечных рядов (каскада водозаборов), рассчитывается по формуле (Ф. М. Бочеввер, 1968)

$$Q_n = \frac{2\pi k m S}{\ln \frac{0,16B}{r_0 \sin \frac{\pi l}{B}} + \frac{3,55 \sqrt{at}}{B}}, \quad (\text{XI.30})$$

где l — расстояние скважины или концентрированного водозабора от ближайшей непроницаемой границы.

При расположении скважин по середине полосы шириной B при $l = B/2$ и $\sin \pi l/B = 1$ формула (XI.22) упрощается

$$Q_{\text{скв}} = \frac{2\pi k m S}{\ln \frac{\sigma}{2\pi r_0} + \frac{3,55 \sqrt{at}}{\sigma}}, \quad (\text{XI.31})$$

где $Q_{\text{скв}}$ — дебит одной скважины, работающей в полосе шириной σ .

Если в пласте-полосе эксплуатируются два поперечных ряда скважин, то дополнительная срезка уровня от их взаимовлияния находится по формуле

$$\Delta S = \frac{Q_n \sqrt{at}}{Bkm} i \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right), \quad (\text{XI.32})$$

где B — длина ряда, вызывающего срезку уровня;

x — расстояние между рядами водозабора.

Для условий второго типа речных долин, в строении которых принимает участие двухслойная толща с учетом процессов перетекания подземных вод из верхнего горизонта (см. рис. 61), при гидродинамических расчетах должны использоваться обобщенные значения коэффициентов водопроводимости и пьезопроводности, определяемые по данным кустовых откачек или опыта эксплуатации действующих водозаборов. При наличии взаимосвязи между водоносными горизонтами обобщенная величина коэффициента уровнепроводности нижнего эксплуатационного горизонта определяется отношением

$$a = \frac{(km)_2}{\mu_1} \quad (\text{XI.33})$$

где km — водопроницаемость нижнего эксплуатирующегося горизонта, $m^2/сут$;

μ_1 — водоотдача верхнего горизонта, из которого происходит перетекание в нижний.

Далее расчетом необходимо доказать, что сбрасываемые ранее накопленные запасы подземных вод в пределах участка водозабора могут быть полностью восполнены с помощью простейших мероприятий искусственной инфильтрации без перерыва постоянного отбора. Методика оценки восполнения подземных вод в период паводков зависит от применяемого способа искусственной инфильтрации (затопление поймы и прилегающих участков долины, русловое регулирование временного стока мелкими плотинами или дамбами, земляными валами и т. д.), геологического строения затопляемых участков и характера фильтрации воды — подпертого или свободного. Для приближенных расчетов восполнения запасов подземных вод способом затопления области влияния водозабора применяется формула, учитывающая известные решения о подпоре подземных вод вблизи рек и водохранилищ (Е. Л. Минкин, 1973 г.)

$$Q_{\text{восп}} \approx \frac{\mu H_0 F}{2t} \left(1 + \frac{VT}{B} \right), \quad (\text{XI.34})$$

где $Q_{\text{восп}}$ — величина расхода искусственного восполнения способом затопления, $m^3/сут$;

μ — недостаток насыщения пород зоны аэрации;

H_0 — превышение подпертого уровня воды над сработанным уровнем подземных вод, м;

F — площадь затопления, m^2 ;

t — время между двумя последовательными затоплениями, сут;

B — ширина полосы затопления, м;

T — продолжительность периода затопления, сут.

При однослойном строении затопляемой площади водоносного горизонта и поддержании напора воды в области искусственного питания время t_0 , в течение которого инфильтрующиеся воды достигнут уровня грунтовых вод, может быть определено по известной формуле Цункера

$$t_0 = \frac{\mu}{K} \left[Z - \Delta H \ln \left(1 + \frac{Z}{\Delta H} \right) \right], \quad (\text{XI.35})$$

где K — коэффициент фильтрации пород зоны аэрации, м/сут;

ΔH — высота слоя воды над поверхностью поймы, м;

Z — глубина просачивания воды от поверхности поймы до уровня грунтовых вод, м.

Численный анализ показывает, что полное водонасыщение однородных песчаных пород при вертикальной фильтрации поверхностных вод на участке влияния водозабора может происходить

в течение короткого времени, исчисляемого несколькими часами.

При двухслойном строении поймы величина инфильтрационного расхода на участке затопления площадью F может быть определена по формуле

$$Q_{\text{восп}} = KF \frac{\Delta H + \frac{1}{2} \Delta H_{\text{к}} + m_0}{m_0}, \quad (\text{XI.36})$$

где m_0 — мощность верхнего слабопроницаемого слоя, м;

$\Delta H_{\text{к}}$ — высота капиллярного давления менисков на границе раздела сухого и увлажненного грунта, м.

Обычно для ориентировочной оценки $\Delta H_{\text{к}}$ используется зависимость

$$\Delta H_{\text{к}} \approx \frac{0,4}{\sqrt{K}}$$

При русловом регулировании стока, если в результате устройства подпорных дамб или мелких плотин произошел дополнительный подпор уровня воды в реке на величину ΔH_0 , то искусственные ресурсы подземных вод (расход восполнения) при односторонней фильтрации из реки могут быть найдены по формуле (Бочев, 1968)

$$Q_{\text{восп}} = \frac{km \Delta H_0 L}{V \text{лат}}, \quad (\text{XI.37})$$

где t — время, в течение которого подъем уровня воды составляет S_0 ;

L — длина расчетного участка инфильтрации из реки.

При двухсторонней фильтрации из реки найденная величина расхода восполнения должна быть удвоена.

Формула (XI.37) справедлива при условии, если в реке в период искусственного питания поддерживается постоянный уровень. В случае его изменения во времени кривая $S_0 = f(t)$ заменяется ступенчатым графиком, а влияние каждого подъема или снижения уровня в реке суммируется.

При режиме свободной фильтрации (дождевания) из реки или участка затопления, когда движение воды происходит с неполным заполнением пор, а давление на уровень грунтовых вод равно атмосферному, восполнение грунтовых вод подсчитывается по формуле

$$Q_{\text{восп}} = \frac{h_p + m_0}{A_0} F, \quad (\text{XI.38})$$

где h_p — средняя глубина воды в реке, м;

m_0 — мощность слабопроницаемого слоя, м;

A_0 — коэффициент сопротивления заиленного слоя фильтрации, устанавливаемый опытным путем, сут.

По рассчитанному среднему расходу восполнения и необходимому объему магазинирования подземных вод определяется

требуемая длина участка восполнения, площадь затопления и подбирается общая продолжительность искусственной инфильтрации.

Расчеты по приведенным выше аналитическим зависимостям вследствие сложности гидрогеологических условий, не всегда достаточно достоверной их схематизации и трудности в определении гидрогеологических параметров могут применяться лишь для приближенной оценки искусственного восполнения подземных вод.

Более надежные результаты дают фактические наблюдения за режимом подземных вод на разведочном участке искусственного восполнения. При известных значениях μ — недостатке насыщения пород зоны аэрации — и средней по площади высоте подъема уровня грунтовых вод приращение искусственных запасов составит

$$V_n = \mu \Delta h F, \quad (\text{XI.39})$$

где V_n — объем искусственно восполненных запасов подземных вод, м³.

Таким образом, при наличии регулируемой емкости водоносного горизонта и периодически действующего поверхностного стока с помощью искусственного восполнения запасов грунтовых вод достигается непрерывная эксплуатация водозабора с постоянным расходом.

Если известны объем естественных запасов V и производительность водозабора Q_n , то максимальную допустимую продолжительность периода без искусственного восполнения подземных вод приближенно можно оценить по следующему уравнению:

$$t = \frac{\alpha V}{Q_n}, \quad (\text{XI.40})$$

где α — коэффициент извлечения запасов (обычно равный 0,5—0,7).

Более точно для конкретных граничных условий и систем расположения эксплуатационных скважин время t рекомендуется определять гидродинамическим методом по формулам неустановившегося движения подземных вод, способом подбора. Для этого производится серия расчетов понижения уровня при дебите водозабора Q_n и задаваемых значениях t , близких к приближенному значению, найденному по формуле (XI.40). Искомая продолжительность работы водозабора, обеспеченная объемом регулируемых запасов, будет соответствовать тому из расчетных понижений, которое равно допустимому понижению уровня. Последнее ограничивается минимальной водозахватной способностью фильтра, обеспечивающей получение требуемого расхода эксплуатационной скважины.

Возможность магазинирования подземных вод во многом зависит также от наличия естественной подземной емкости, обеспе-

чивающей, с одной стороны, аккумулярование необходимых объемов поверхностных вод и, с другой; благоприятные условия для их самоочищения в период фильтрации через породы зоны аэрации.

Для конкретных систем водозаборных скважин приемистость пласта может быть определена гидродинамическим методом как произведение расчетного дебита на время работы водозабора t

$$W_{\text{пр}} = \frac{2\pi k S (2h - S) t}{R}, \quad (\text{XI.41})$$

где S — допустимое понижение уровня;

R — общее гидравлическое сопротивление, определяемое границами пласта, его параметрами и системой водозабора в условиях неустановившегося режима фильтрации (Бочевер, 1968).

Для оценки естественного и искусственного регулирования запасов необходимо составлять прогноз баланса подземных вод участка водозабора. Такой прогноз может быть как внутригодовым (на конец каждого месяца, например, для года с величиной стока 95% обеспеченности), так и многолетним (эпигноз), когда оценивается возможное изменение емкостных запасов на конец каждого года.

Оценка баланса подземных вод на участке эксплуатации на каждый заданный момент времени производится по формуле

$$V_t = V_0 - Q_{\text{в}} t_1 + Q_{\text{е}} t_2 + Q_{\text{и}} t_3, \quad (\text{XI.42})$$

где V_t — объем накопленных (естественных и искусственных) запасов подземных вод в каждый момент времени t ;

V_0 — первоначальный объем емкостных запасов;

$Q_{\text{в}}$ — расход водозабора при расчетной продолжительности эксплуатации t_1 ;

$Q_{\text{е}}$ — естественное, в том числе привлекаемое питание подземных вод (фильтрация из реки, инфильтрация атмосферных осадков) при продолжительности питания t_2 ;

$Q_{\text{и}}$ — искусственное питание подземных вод при продолжительности периода восполнения t_3 с учетом к. п. д. системы искусственной инфильтрации.

Немаловажное значение при этом приобретает учет возможной многолетней изменчивости естественного восполнения запасов грунтовых вод. Методика многолетнего естественного восполнения подземных вод участка водозабора сводится к выявлению корреляционной связи между величиной питания подземных вод и основными источниками восполнения — фильтрацией из реки и инфильтрацией атмосферных осадков.

По найденным эмпирическим зависимостям и данным многолетних гидрометеорологических наблюдений (сток, осадки) устанавливаются многолетние распределения естественных ресурсов

подземных вод участка, а также рассчитываются значения ресурсов различной обеспеченности (в %; Сычев, 1975).

По результатам расчетов на конец каждого месяца или года составляются балансовая таблица и хронологический график возможной сработки и восполнения запасов подземных вод, которые позволяют установить оптимальную величину водоотбора с участка и выработать рациональный режим естественного и искусственного регулирования эксплуатационных запасов.

Многолетняя изменчивость естественного восполнения грунтовых вод была исследована на участке одного из водозаборов

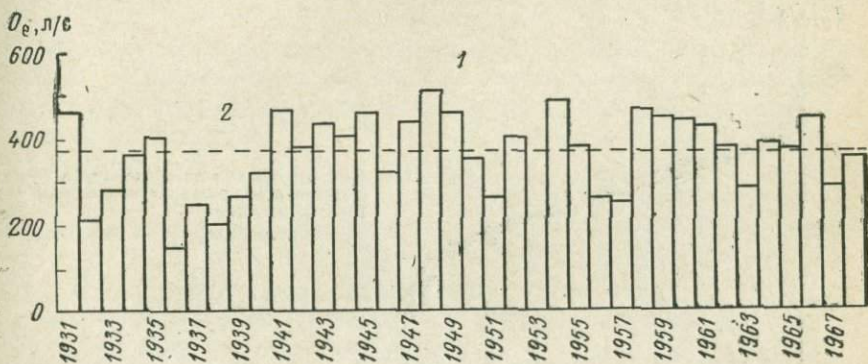


Рис. 62. Многолетнее распределение естественного восполнения запасов грунтовых вод в среднем течении долины р. Шерубайнуры.

1 — среднегодовые расходы восполнения; 2 — среднее многолетнее значение естественных ресурсов

в речной долине с периодическим стоком (Центральный Казахстан). Условия формирования подземных вод долины характеризуются активной взаимосвязью с поверхностным слоем, обладающим резко выраженным периодическим режимом. Величина восполнения запасов грунтовых вод определялась по данным наблюдений за их режимом в специально созданной сети скважин как приращение объема естественных запасов на балансовом участке площадью около 80 км².

С использованием многолетних гидрологических наблюдений была установлена корреляционная зависимость между величиной восполнения грунтовых вод и объемом поверхностного стока, проходящего в весенний период

$$Q_e = 451 \ln \ln (W_p - 2,7) - 112, \quad (\text{XI.43})$$

где Q_e — естественное восполнение грунтовых вод, л/с;

W_p — объем поверхностного стока в период весеннего половодья, млн. м³.

Ежегодное естественное восполнение запасов грунтовых вод участка было рассчитано на 38-летний период с 1931 по 1968 г. (рис. 62).

Статистическая обработка опытных данных по стандартной программе для уравнений парной регрессии показала достаточно тесную связь между Q_e и W_p (коэффициент корреляции 0,86). При подсчете ординат кривой обеспеченности среднегодовых значений естественного восполнения грунтовых вод наиболее близкие к фактическим данные были получены при найденных коэффициентах вариации $C_v = 0,24$ и асимметрии $C_s = C_v$.

Анализ фактической и теоретической кривых обеспеченности (рис. 63) позволил сделать следующие выводы:

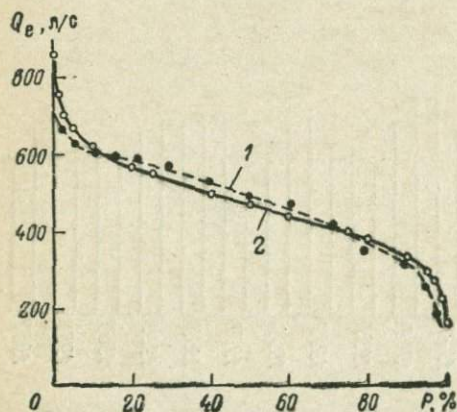


Рис. 63. Кривые обеспеченности P (%) естественных ресурсов подземных вод участка долины:
1 — фактическая; 2 — теоретическая

1) максимальная из найденных величин питания грунтовых вод участка 515 л/с (1948 г.) примерно в 3,5 раза превышает минимальную из зафиксированных за 38-летний период — 148 л/с (1936 г.);

2) наибольшая длительность периода с величиной восполнения ниже нормы (370 л/с) наблюдалась с 1936 до 1940 г. включительно (или 5 лет подряд). Это значит, что общий расчетный срок сработки естественных запасов подземных вод при проектировании водозабора должен приниматься порядка 1800 сут;

3) в связи с многолетней изменчивостью естественного восполнения грунтовых вод в долинах рек засушливых областей оценка его по данным наблюдений за один-два года, т. е. в течение периода гидрогеологических изысканий, может привести к существенным ошибкам в сторону завышения или занижения среднегодовых значений;

4) для достоверных прогнозов работы водозабора и режима естественного восполнения подземных вод в таких условиях необходимо проводить наблюдения не менее 7—10 лет подряд для установления корреляционной связи с основными природными факторами формирования ресурсов подземных вод.

Искусственное регулирование емкостных запасов подземных вод при наличии временного поверхностного стока может произ-

водиться также с помощью системы инфильтрационных бассейнов периодического действия.

Для варианта периодического режима искусственного восполнения вначале определяется расход водозабора, обеспеченный только за счет сработки в пласте естественных запасов подземных вод.

Для линейного ряда взаимодействующих скважин большой протяженности в пласте неограниченных в плане размеров единичный дебит водозабора составит

$$q_{в} = \frac{2kmS}{L_{в} + 2L_{кс}}. \quad (XI.44)$$

Для водозабора из равнодебитных скважин, расположенных в виде линейного ряда посередине пласта-полосы с двумя параллельными непроницаемыми контурами, единичный дебит определяется по формуле

$$q_{в} = \frac{2kmS}{L_{вк} + 2L_{кс}}, \quad (XI.45)$$

$$L_{вк} = \frac{2at}{B} + \frac{B}{\sigma}, \quad (XI.46)$$

где B — ширина пласта-полосы, м;

S — понижение уровня, принимаемое равным или меньше допустимого понижения, м.

В последующий после сработки запасов период расход искусственного восполнения должен быть таким, чтобы, во-первых, обеспечивалась постоянная работа водозабора с прежней производительностью и, во-вторых, чтобы к концу фильтрацикла достигалось полное восстановление ранее сработанных запасов, извлеченных из горизонта за период независимого режима (за время отсутствия искусственной инфильтрации).

Заданным выше условиям соответствует следующее балансовое уравнение

$$q_{и} = q_{и1} + q_{и2} = \frac{q_{в}}{\alpha} + q_{и2}, \quad (XI.47)$$

где $q_{и1}$ — часть единичного расхода на фильтрацию из систем искусственного восполнения, обеспечивающая работу водозабора с прежней производительностью;

$q_{и2}$ — часть этого же расхода, обеспечивающая полное восполнение в течение фильтрацикла сработанных ранее запасов.

Для водозабора в виде линейного ряда скважин коэффициент $\alpha = L_{с}/(L_{в} + 2L_{кс})$, а часть единичного расхода из системы искусственного восполнения при $S = \Delta h$ составит

$$q_{и2} = \frac{2kmS}{L_{с} + 2L_{кс}},$$

где Δh — повышение уровня подземных вод при искусственном питании.

На этом основании необходимый расход искусственной инфильтрации подземных вод после периода сработки запасов будет равен

$$q_n = \frac{q_v(L_n + 2L_{кс})}{L_0} + \frac{2kmS}{L_0 + 2L_{кс}} \quad (XI.48)$$

Суммарный требуемый расход на инфильтрацию при общей длине участка водозабора l будет равен произведению $Q_n = q_n \cdot l$. На основании данных о требуемом расходе искусственного восполнения Q_n и средней скорости инфильтрации v_n определяется необходимая общая площадь инфильтрации бассейнов по формуле

$$F = \frac{Q_n}{v_n} \quad (XI.49)$$

По величине общей площади инфильтрации производится расчет необходимого количества бассейнов, исходя из типовых размеров.

Таким образом, задача по регулированию емкостных запасов подземных вод при наличии временного источника искусственного восполнения решается путем расчета производительности водозабора на сработку запасов при заданном понижении уровня с последующей оценкой необходимого периодического расхода искусственного восполнения.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ЧЕТВЕРТОГО ТИПА ИСКУССТВЕННОГО ПИТАНИЯ

Как следует из общих условий формирования искусственных ресурсов и запасов пресных подземных вод, четвертый тип в гидрогеологическом отношении характеризуется двумя разновидностями (см. табл. 1):

а) накоплением в породах зоны аэрации емкостных запасов пресных подземных вод в виде линз с помощью свободного налива поверхностных вод в специальные скважины или инфильтрационные бассейны;

б) искусственным питанием (ресурсами) напорных вод в пластовых условиях с помощью нагнетания поверхностных вод через специально оборудованные скважины.

Как показали опытные исследования (В. Н. Кунин, Г. Т. Лещинский, 1970 г.), в аридной зоне СССР перспективным направлением может явиться первая разновидность — искусственное магазинирование поверхностных вод в подземных емкостях в форме линз пресных вод с последующим периодическим или постоянным отбором системой каптажных сооружений. В качестве подземной емкости могут быть использованы породы зоны аэрации или верхняя часть разреза пород зоны полного насыщения.

Проведенные опыты позволили сделать вывод о том, что накопление емкостных запасов за один сезон аккумуляции происходит в ограниченных объемах. Поэтому такие запасы могут быть использованы преимущественно для удовлетворения потребности мелких объектов, т. е. для децентрализованного водоснабжения колхозов, ферм, отделений совхозов или колхозов с ограниченной потребностью в воде.

Методика оценки эксплуатационных запасов подземных вод искусственно формируемых линз пресных вод включает в себя следующее:

1) прогноз условий формирования линзы пресных вод, ее размеров с учетом насыщения пород зоны аэрации или в породах водоносного горизонта минерализованных подземных вод (возможное растекание линзы пресных вод после прекращения искусственной инфильтрации);

2) оценку эксплуатационных запасов пресных подземных вод, накопленных в линзе, при условии их охраны от подтягивания соленых вод снизу или сбоку.

В начальной стадии фильтрации из сооружений открытого типа вода расходуется на насыщение пород зоны аэрации под дном бассейна и частично на боковое растекание в результате проявления всасывающего эффекта. В таких условиях (как отмечалось выше) важно знать две основные характеристики процесса фильтрации: а) продолжительность периода, при котором произойдет смыкание фронта инфильтруемых вод с естественными грунтовыми водами и б) общие потери воды, которые требуются на полное насыщение пород зоны аэрации под дном бассейна.

Продолжительность стадии промачивания пород в условиях применения способов искусственного восполнения, основанных на площадном распределении поверхностных вод, зависит от строения зоны аэрации водоносного горизонта. При однослойном строении зоны аэрации, сложенной относительно однородными в фильтрационном отношении породами, время продвижения фронта промачивания для условий одномерного потока рассчитывается приближенно по формуле Цункера (XI.35).

При двухслойном строении зоны аэрации время просачивания через верхний слабопроницаемый слой мощностью m_0 может определяться по той же зависимости при $Z = m_0$.

Как показывают расчеты, наличие слабопроницаемого слоя с коэффициентом фильтрации, значительно меньшим, чем проницаемость основной толщи пород ($K/K_0 > 100$), может увеличить продолжительность периода просачивания в несколько раз по сравнению с фильтрацией через неэкранированную толщину пород.

Продолжительность периода просачивания через второй слой определяется приближенно по формуле Н. Н. Биндемана

$$t_2 = \frac{\mu (Z - m_0)}{\sqrt[3]{Kv^2}}, \quad (\text{XI.50})$$

где μ — недостаток насыщения;

v_0 — скорость инфильтрации, м/сут.

Общая продолжительность периода до смыкания инфильтрационного потока с капиллярной каймой грунтовых вод при двухслойном строении зоны аэрации равна суммарному времени просачивания через оба слоя.

Объем воды, необходимый на насыщение пород зоны аэрации, может определяться по формулам, учитывающим различную форму бассейнов в плане и угол заложения их откосов (И. С. Глазунов, Н. В. Роговская, 1968). Как показали проработки, в общем случае для приближенного расчета этого объема воды применима зависимость

$$v \approx \pi (r_{пр} + h_0)^2 h_a \mu, \quad (XI.51)$$

где h_a — мощность зоны аэрации, м;

$r_{пр}$ — приведенный радиус инфильтрационного бассейна (радиус большого колодца), м.

После смыкания фронта промачивания с грунтовыми водами наступает стадия формирования линзы пресных вод, ее рост по площади и на глубину. В практике прогноза развития линз пресных вод среди соленых применяются упрощенные решения, основанные на предпосылке «поршневого вытеснения» минерализованных вод пресными и учитывающие различия в их плотностях.

На основании предположения о том, что расход поступающих из бассейна вод равномерно распределен по вертикальной оси линзы, а скорость фильтрации в горизонтальном направлении значительно превышает скорости по вертикали, В. Д. Гродзенским (1965 г.) получены расчетные зависимости для определения возможных размеров линзы в процессе искусственного восполнения с помощью инфильтрационных бассейнов. В качестве граничных условий рассматривается типичный для аридной зоны случай, когда линза полностью располагается на соленых водах, а водоносный горизонт имеет достаточно большую мощность, при которой пресные воды не достигают нижнего водоупора.

Учитывая принцип гидростатического равновесия в системе пресные — соленые воды, приближенное условие, при котором линза пресных вод своей нижней границей достигнет водоупора, имеет следующий вид (Глазунов, 1968):

$$h \geq \frac{\rho_с - \rho_п}{\rho_п} H, \quad (XI.52)$$

где H — средняя мощность водоносного горизонта;

h — превышение верхнего купола формируемой линзы над общим уровнем грунтовых вод.

В зависимости от условий формирования линз пресных вод рассмотрены три основные расчетные схемы (В. Д. Гродзенский, 1966 г.) (рис. 64):

а) при постоянном расходе на питание, когда уровень воды в бассейне непрерывно повышается;

б) после прекращения питания в результате постепенного заиления дна и откосов бассейна;

в) при периодическом возобновлении питания, когда в первый период прекращения подачи воды в бассейн происходит растекание линзы, а затем с возобновлением питания размеры линзы вновь увеличиваются.

Основные расчетные зависимости для прогноза формирования линз пресных вод среди соленых применительно к выделенным типам питания подземных вод приведены в табл. 14.

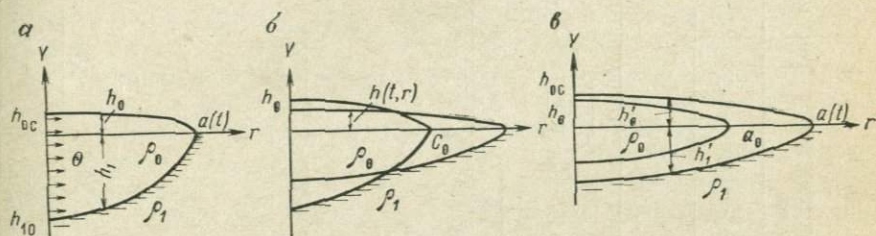


Рис. 64. Схема формирования линзы пресных подземных вод среди соленых: а — при постоянном расходе на питание; б — после прекращения питания; в — при периодическом возобновлении питания

В формулах, приведенных в табл. 14 и на рис. 64, приняты следующие обозначения:

- $a(t)$ — положение крайней точки линзы по горизонтали (в м) на момент времени t (в сут);
- Q — постоянный расход на питание линзы, м³/сут;
- K и n — соответственно коэффициент фильтрации и активная пористость породы;
- h_0 — высота линзы над горизонтальной плоскостью по ее оси, м;
- $h_0(t)$ — то же, при уменьшающемся во времени расходе;
- $h(t, r)$ — высота линзы в любой момент времени t на расстоянии r (в м) от ее оси;

$$\beta = \frac{\rho_c}{\rho_c - \rho_n}, \quad (\text{XI.53})$$

- где ρ_c и ρ_n — плотность соответственно соленых и пресных вод;
- Q_0 — начальный расход на питание линзы при его уменьшении во времени, подчиняющемся экспоненциальной зависимости $Q_0 e^{-\alpha t}$ (α — коэффициент уменьшения инфильтрационного питания);
- a_0 — координата крайней точки линзы в момент прекращения питания;
- h'_0 — высота границы линзы над уровнем соленых вод по ее оси в момент прекращения питания.

Основные зависимости для расчета формирования осесимметричных линз пресных вод среди соленых подземных вод

Режим формирования линз	Положение крайней точки по горизонтали, м	Высота границы линзы над уровнем соленых вод, м	
		по ее оси	в любой момент времени t на расстоянии r от ее оси
При постоянном расходе на питание	$a(t) = \sqrt[4]{\frac{8QK}{\pi n^2 \beta}} t^{1/2} \quad (\text{XI.55})$	$h_0(t) = \sqrt{\frac{Q}{2\pi k \beta}} \quad (\text{XI.56})$	$h(t, r) = h_0 \left[1 - \frac{r^2}{a^2(t)} \right] \quad (\text{XI.57})$
При расходе на питание, затухающем во времени	$a(t) = \sqrt[4]{\frac{16kQd}{n^2 \pi \beta \alpha^2}} \times \sqrt[4]{\alpha t + e^{-\alpha t} - 1} \quad (\text{XI.58})$	$h_0(t) = \sqrt[4]{\frac{Q}{4\pi k \beta}} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\sqrt{\alpha t - e^{-\alpha t} - 1}} \quad (\text{XI.59})$	По формуле (XI.57)
При периодически возобновляющемся питании: а) после прекращения питания	$a(t) = a_0 \left[1 + \frac{8kh'_0 t}{na_0^2} \right]^{1/4} \quad (\text{XI.60})$	$h_0(t) = \frac{h'_0}{1 + \frac{8kh'_0 t}{na_0^2}} \left(1 + \frac{8kh'_0 t}{na_0^2} \right)^{1/2} \quad (\text{XI.61})$	$h(t, r) = \frac{h'_0}{1 + \frac{8kh'_0 t}{na_0^2}} \times \left[\left(1 + \frac{8kh'_0 t}{na_0^2} \right)^{1/2} - \left(\frac{r}{a_0} \right)^2 \right] \quad (\text{XI.62})$
б) при возобновлении питания	$a(t) = \sqrt[4]{\frac{8kh_0 a_{01}^2}{n} t + \frac{8kQ\beta}{\pi n^2} t^2 + a_{01}^4} \quad (\text{XI.63})$	$h_0(t) = \frac{a_{01}^2 h_0(0)}{a^2(t)} + \frac{2Qt}{\pi n \beta a^2(t)} \quad (\text{XI.64})$	По формуле (XI.62)

Текущая глубина границы раздела пресных и соленых вод h_2 (при мощности линзы в любом сечении, равной $h_0 + h_1$) определяется по формуле

$$h_1 = h_0 \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{с}} - \rho_{\text{п}}}. \quad (\text{XI.54})$$

Следует отметить, что наблюдениями, выполненными на участках формирования линз пресных вод в Туркмении, выявлено несоответствие опытным данным существующего представления о непрерывном росте верхнего купола линзы за период ее питания (Глазунов, 1968). Несмотря на продолжающуюся достаточно интенсивную инфильтрацию из бассейна, после роста верхнего купола линзы пресных вод в течение нескольких дней в дальнейшем происходило постепенное снижение поверхности купола и сокращение вертикального размера линзы под дном бассейна. Это позволило авторам эксперимента сделать вывод о том, что рост купола линзы пресных вод осуществляется до тех пор, пока фильтрационный поток в контуре бассейна превышает объем воды, расходуемой на растекание ее по поверхности формируемого бугра грунтовых вод. Большой практический интерес представляет оценка фактических размеров образующихся линз в зависимости от количества профильтровавшейся в водоносный горизонт пресной воды. Так, на опытном участке в юго-западной Туркмении в результате инфильтрации в породы объема воды 58,4 тыс. м³ была сформирована линза, форма которой в контуре минерализации в 2 г/л была близка к окружности радиусом 54,5 м. Средняя мощность линзы составляла 13,4 м при мощности непосредственно под дном котлована 16,6 м.

Методика оценки эксплуатационных запасов линз пресных подземных вод, плавающих на соленых, разработана В. Д. Бабушкиным (1962, 1969).

Оценка производительности водозабора обычно выполняется гидродинамическим методом, путем расчета системы взаимодействия скважин применительно к граничным условиям участка формирования линзы пресных вод.

При оценке запасов необходимо учитывать особенности эксплуатации линз пресных подземных вод. Они заключаются в том, что в процессе работы водозабора возникает опасность подсосывания соленых вод как с боковых сторон линзы, так и снизу. При этом подтягивание соленых вод снизу представляет наибольшую опасность, так как горизонтальные размеры линзы всегда значительно превышают мощность ее пресной воды.

Для прогноза подтягивания соленых вод сбоку могут быть использованы расчетные зависимости (табл. 15), полученные В. М. Гольдбергом (1975 г.), применительно к различным типам водозаборов — одиночному, кольцевой батарее скважин и линейному ряду скважин. Указанные формулы, позволяющие определить время начала подсосывания соленых вод и изменение

Прогноз подтягивания соленых вод сбоку без учета зоны дисперсии (переходной зоны)

Тип водозабора	Время начала подсосывания соленых вод, сут	Изменение минерализации воды во времени
Одиночный или концентрированный на небольшой площади	$T = \frac{\pi mn x^2}{Q} \quad (\text{XI.69})$	$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T}{t}} \quad (\text{XI.70})$
Кольцевая батарея скважин	$T = \frac{\pi mn}{Q} (x^2 - R_0^2) \quad (\text{XI.71})$	$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \frac{x}{\sqrt{\frac{Qt}{\pi mn} + R_0^2}} \quad (\text{XI.72})$
Линейный ряд скважин	$T = \frac{2mnl^2}{\pi Q} \ln \operatorname{ch} \frac{\pi x}{l} \quad (\text{XI.73})$ <p style="text-align: center;">при $\frac{x}{l} \geq 0,5$</p>	$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{l^{bt} - l^{bT}}{l^{bT} - 1}} \quad (\text{XI.75})$ <p style="text-align: center;">$b = \frac{\pi Q}{mnl}$</p>
	$T = \frac{2mnl}{\pi Q} \left(\frac{\pi x}{l} - 0,7 \right) \quad (\text{XI.74})$	

- Q — дебит водозабора, м³/сут;
 x — расстояние от центра водозабора до контура соленых вод, м;
 C_1 и C_0 — минерализация соответственно соленых и пресных вод, г/л;
 R_0 — радиус кольцевой батареи скважин, м;
 l — расстояние между скважинами в ряду, м;
 t — время эксплуатации водозабора, сут;
 T — время начала подсосывания соленых вод ($t > T$), сут.

минерализации воды во времени, выведены исходя из предпосылки о поршневом вытеснении пресной воды соленой, т. е. без учета образования зоны дисперсии (переходной зоны), что дает при расчетах по ним определенный «запас инженерной надежности». Для прогноза засоления снизу рекомендуется проводить расчет максимально возможной минерализации смешанной воды, отбираемой водозабором, по формулам, в зависимости от вертикальной неоднородности водоносного горизонта (Бабушкин, Глазунов, Гольдберг, 1962).

В относительно однородном в фильтрационном отношении водоносном пласте применима зависимость

$$C_{\max} = C_1 - (C_1 - C_0) \frac{h_0}{h_1}. \quad (\text{XI.65})$$

В неоднородном по вертикали водоносном горизонте могут наблюдаться два случая:

1) граница соленых и пресных вод располагается в верхнем слое с коэффициентом фильтрации K_1

$$C_{\max} = C_1 - (C_1 - C_0) \frac{K_1 h_0}{Kh}; \quad (\text{XI.66})$$

2) граница соленых и пресных вод располагается в нижнем слое с коэффициентом фильтрации K_2

$$C_{\max} = C_1 - (C_1 - C_0) \frac{K_2 h_1}{Kh}. \quad (\text{XI.67})$$

Здесь C_1 и C_0 — минерализация соответственно соленых и пресных вод, г/л;

h , h_0 и h_1 — общая мощность водоносного горизонта, мощность пресных и соленых вод, м;

K — средневзвешенный по вертикали коэффициент фильтрации водоносного горизонта, определяемый по формуле

$$K = \frac{K_1 h'_1 + K_2 h'_2}{h}, \quad (\text{XI.68})$$

где h'_1 и h'_2 — мощности слоев с коэффициентами фильтрации соответственно K_1 и K_2 , м.

Если максимальная минерализация воды, определенная по одной из формул (XI.65), (XI.66) или (XI.67), окажется больше минерализации, допустимой нормами качества воды согласно существующим стандартам или требованиям, то производится дополнительный прогноз изменения минерализации воды во времени за счет подтягивания соленых вод снизу.

В. М. Гольдбергом (1975 г.) получены решения, позволяющие оценить время начала подсосывания соленых вод и изменение минерализации отбираемой воды во времени для случая, когда

мощность зоны соленых вод значительно превышает мощность пресных вод линзы.

Для несовершенной скважины, фильтр которой расположен в верхней зоне пресных вод, время начала подсосывания соленых вод может быть определено по уравнению

$$T = \frac{2\pi l (h_0 - l)^3}{3Q \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)}, \quad (\text{XI.76})$$

а изменение минерализации отбираемой воды во времени определяется зависимостью

$$C = C_1 - (C_1 - C_0) \left[\frac{1}{\beta} + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \sqrt[3]{\frac{T}{t}} \right]. \quad (\text{XI.77})$$

В формулах (XI.76) и (XI.77) приняты следующие обозначения:

Q — дебит колодца или скважины, м³/сут;

r_k — радиус дна колодца (полусферы), м;

l — длина фильтра несовершенной скважины, м;

β — коэффициент, характеризующий несовершенство скважины по степени вскрытия пласта и определяемый (приблизительно) по табл. 16 в зависимости от соотношения длины фильтра l_k и общей мощности водоносного горизонта h ($l = l_k/h$).

Таблица 16

Значения коэффициента β

\bar{l}	0,05—0,1	0,1—0,2	0,2—0,4	0,4—0,6	0,6—0,8
$\beta_{\text{ср}}$	2	1,7	1,4	1,3	1,1

Если прогнозная минерализация отбираемой водозабором воды окажется по расчету больше, чем допустимая по нормам существующих стандартов (ГОСТ 2874—73, требования к качеству для водопоя скота и т. д.), то эксплуатация пресных вод линзы должна осуществляться (как это рекомендует В. Д. Бабушкин) с применением защиты от подсосывания соленых вод снизу методом спаренных скважин. Сущность этого метода заключается в том, что при одновременной работе двухъярусно расположенных скважин, из которых одна оборудована фильтром на пресные, а другая — на соленые воды, образуется поверхность раздела двух потоков, питающих отдельно верхнюю и нижнюю скважины. Если при этом граница раздела потоков располагается несколько выше границы пресных и соленых вод или, по крайней мере, совпадает с ней, то при эксплуатации ярусного водо-

забора верхняя скважина будет давать пресную воду, а нижняя — соленую.

По данным теоретических и экспериментальных исследований было показано, что для исключения подсосывания соленых вод верхней скважиной отношение дебитов скважин λ , отбирающих пресную и соленую воду, в однородном водоносном горизонте не должно превышать отношения средних мощностей пресных и соленых вод, т. е. должно соблюдаться условие

$$\lambda = Q_n/Q_c \leq \frac{h_0}{h_1}, \quad (\text{XI.78})$$

где Q_n и Q_c — дебиты скважин, отбирающих соответственно пресные и соленые воды, м³/сут;

h_0 и h_1 — мощности слоев пресных и соленых вод, м.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод при ярусной системе водоотбора сводится к определению дебитов верхней и нижней скважин в спаренной системе.

Для расчета дебита верхней скважины, забирающей пресную воду, используется формула

$$Q_n = \frac{2\pi KhS_1}{\ln \frac{R_n}{r_0} + \varphi_2}, \quad (\text{XI.79})$$

где S_1 — понижение уровня воды в верхней скважине, м;
 r_0 — расчетный радиус фильтра скважины с учетом ее несовершенства, м;

φ_2 — коэффициент, характеризующий влияние откачки из нижней скважины на понижение уровня воды в верхней скважине;

$R_n = 1,5\sqrt{at}$ — величина приведенного радиуса в условиях не установившегося режима фильтрации, м.

Величина φ_2 определяется по формуле

$$\varphi_2 = \frac{1,15}{\lambda} \left(\frac{h}{l_2} \xi_2 + \lg \frac{R_n^2}{\beta} \right), \quad (\text{XI.80})$$

где $\beta = (2h - b_1)(h + b_1)$,

$$\xi_2 = \lg \frac{b_2^2 - b_1^2}{C_2^2 - b_2^2} + \lg \frac{2h - C_2 - b_1}{2h - b_2 - b_1}, \quad (\text{XI.81})$$

C_1 и C_2 — расстояние от статического уровня до верхних концов фильтров скважин, забирающих соответственно пресную и соленую воду;

$b_1 = C_1 + l_1$ и $b_2 = C_2 + l_2$ — расстояния от статического уровня до нижних концов фильтров скважин, откачивающих пресные и соленые воды.

Вторым слагаемым в формуле (XI.81) для расчета ξ_2 обычно можно пренебречь, если длина фильтра нижней скважины невелика по сравнению с общей мощностью водоносного горизонта (например, $l_2 \leq 0,2h$).

Дебит нижней из спаренных скважин, отбирающей соленые воды, находится по формуле

$$Q_c = \frac{Q_p}{\lambda}, \quad (\text{XI.82})$$

где λ — коэффициент для однородного в фильтрационном отношении водоносного горизонта.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ПЯТОГО ТИПА ИСКУССТВЕННОГО ПИТАНИЯ

Для пятого типа характерно формирование линз пресных подземных вод в непосредственной близости от действующих ирригационно-обводнительных или водотранспортных каналов. В гидрогеологической практике их называют «приканальные линзы».

Из всех разновидностей приканальных линз пресных вод рассмотрим методику оценки эксплуатационных запасов линз, отвечающих гидрогеологическим условиям, приведенным на рис. 6. Как видно из рис. 6, пресные подземные воды, сформировавшиеся при длительной эксплуатации канала, в вертикальном разрезе непосредственно подстилаются водонепроницаемыми породами; контакт с солеными водами наблюдается только со стороны боковых границ.

Границы распространения приканальных линз должны быть выявлены в процессе проведения в начале геофизических работ, а затем поисково-разведочного бурения гидрогеологических скважин. С этой целью объемы поисково-разведочных, геофизических и буровых работ на изучаемой площади рекомендуется размещать по системе поперечников, расположенных перпендикулярно к каналу. По данным геофизических исследований и гидрогеохимического опробования подземных вод в скважинах определяются положения границ потока пресных подземных вод в плане и разрезе.

Целесообразно также в период разведки приканальной линзы изучать режим пресных и соленых подземных вод.

Для оценки эксплуатационных запасов пресных подземных вод в приканальных линзах важным параметром является величина инфильтрационного питания за счет неизбежных потерь воды из канала. Поэтому условия питания должны быть достаточно тщательно изучены в процессе разведки. Разработаны аналитические методы расчетов инфильтрационных потерь из ир-

ригационных каналов. Расчеты эти применительно к решению рассматриваемой задачи являются приближенными.

В связи с этим оценку питания приканальной линзы пресных вод с достаточной надежностью и достоверностью целесообразно произвести опытным путем с помощью групповой откачки по методике, разработанной В. П. Волковым и В. А. Гейнцем (НПО «Узбекгидрогеология»). Групповую откачку авторы рекомендуют проводить одновременно из 3—5 разведочных скважин, расположенных в виде линейного ряда, заложенного параллельно каналу. Наблюдательные скважины целесообразно располагать по всему поперечнику линзы с таким расчетом, чтобы иметь необходимый объем данных для построения карты гидроизогипс.

Групповую откачку необходимо проводить с такой производительностью, чтобы через сравнительно короткое время (один-два месяца) достигнуть во всех скважинах опытного участка (опытных и наблюдательных скважинах) стационарный режим фильтрации потока. Суммарный дебит скважин групповой откачки, размер депрессионной воронки в плане позволяют в данном случае определить средний расход питания на единицу длины будущего водозабора за счет инфильтрации из канала.

Как указывают авторы, групповую откачку с целью определения величины питания целесообразно проводить в период, когда уровень воды в канале занимает среднее положение между максимумом и минимумом.

Среднегодовое питание линзы может быть рассчитано по данным групповой откачки по следующей простой зависимости:

$$q_{\text{ср}} = q_{\text{оп}} \frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{оп}}}, \quad (\text{XI.83})$$

где $q_{\text{оп}}$ — среднее питание линзы за счет инфильтрационных потерь из канала, определенное групповой откачкой;
 $I_{\text{оп}}$ — напорный градиент потока в период групповой откачки;
 $I_{\text{ср}}$ — среднее значение напорного градиента потока в естественных условиях в течение года.

В зависимости от условий питания линзы и гидрогеологических условий, отражающих взаимосвязь поверхностных и подземных вод, могут быть две расчетные схемы оценки эксплуатационных запасов.

Первая расчетная схема отражает в условиях взаимосвязи грунтовых вод и вод канала подпертый режим фильтрации. При этом водозаборные скважины, заданные в виде линейного ряда параллельно каналу, будут работать как инфильтрационное каптажное сооружение. Дебит скважины водозабора в значительной мере будет обеспечиваться в процессе эксплуатации за счет дополнительного инфильтрационного притока воды из канала. Причем канал действует круглогодично.

Борьба с заилием донных отложений канала в процессе эксплуатации водозабора может быть осуществлена путем периодической его чистки.

При такой расчетной схеме для оценки допустимой общей производительности водозабора очень важно обеспечение качества отбираемых подземных вод и предотвращения возможного подтягивания к эксплуатационным скважинам бокового контура соленых вод. Эта задача может быть решена путем построения карты линии токов для определения области «захвата водозабора». Допустимая для данных условий суммарная производительность водозабора должна быть принята из условий, чтобы точка перегиба возбужденного фильтрационного потока в плане располагалась внутри площади линзы пресных вод. В таких условиях подтягивания соленых вод не должно произойти.

Расположение точки перегиба в структуре фильтрационного потока для большого ряда скважин, заданных вдоль канала, можно определить по следующему уравнению (Бабушкин, 1969):

$$y = \frac{b}{\pi} \operatorname{arch} \left(\frac{2sh \frac{\pi d}{b} + 4 \frac{qb}{Q} ch \frac{\pi d}{b}}{\frac{4qb}{Q}} \right), \quad (\text{XI.84})$$

где y — расстояние от точки перегиба фильтрационного потока до скважин линейного ряда;

b — половина расстояния между скважинами в линейном ряду;

Q — дебит отдельной скважины линейного ряда;

q — половина единичного расхода питания линзы за счет потерь из канала в естественных условиях;

d — расстояние от скважин линейного ряда до канала (с учетом значения ΔL).

Последующие расчеты для оценки эксплуатационных запасов пресных подземных вод линзы должны выполняться в определенной последовательности.

Вначале определяется величина дополнительного сопротивления русловых отложений канала по следующей зависимости В. М. Шестакова:

$$\Delta L = \sqrt{\frac{K}{K_1} H m_1} \operatorname{cth} \left(b_k \sqrt{\frac{K_1}{K m_1 H}} \right), \quad (\text{XI.85})$$

где ΔL — дополнительное сопротивление заиленного слоя под дном канала;

K — коэффициент фильтрации водоносных пород;

K_1 — коэффициент фильтрации заиленного слоя;

H — мощность водоносного горизонта линзы пресных вод;

m_1 — мощность заиленного слоя;

b_k — половина ширины канала.

Затем рассчитывается производительность скважины при взаимодействии их в линейном ряду, расположенном параллельно каналу, для условий установившейся фильтрации потока (уравнение Маскета — Лейбензона)

$$Q = \frac{\pi K (2h - S) S}{\ln \frac{b}{\pi \alpha r_0} + \frac{\pi d}{b}}, \quad (\text{XI.86})$$

где S — понижение уровня воды в скважинах линейного ряда (обычно $S = (0,3-0,5) H$);

r_0 — радиус скважины;

α — коэффициент несовершенства скважин, определяемый по обычной методике.

Вторая расчетная схема определения эксплуатационных запасов пресных вод приканальной линзы основана на условии, когда в процессе эксплуатации водозабора происходит отрыв уровня грунтовых вод от заиленного слоя под дном канала, т. е. отвечает условиям свободной фильтрации. В этих условиях постоянные фильтрационные потери из канала не будут связаны с работой водозабора.

Оценка эксплуатационных запасов для второй расчетной схемы производится в такой же последовательности, как и для первой. Однако, расчетное понижение уровня воды во взаимодействующих скважинах следует определять по уравнению

$$S_{\text{рас}} = H \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K} \left(\ln \frac{b}{\pi d r_0} + \frac{\pi L_{\text{п}}}{2b} \right)}, \quad (\text{XI.87})$$

где $L_{\text{п}} = 1,4 \sqrt{at}$;

a — коэффициент уровнепроводности;

t — продолжительность работы водозабора (25 лет).

Расчетное понижение уровня при этом должно быть равно или меньше $S_{\text{доп}} \leq (0,3-0,5) H$.

Оценка эксплуатационной возможности для шестого и седьмого типовых условий формирования искусственных запасов подземных вод в настоящем разделе не рассматривается. Эксплуатационные запасы для этих типовых условий могут быть оценены по обычной общепринятой методике, разработанной для естественных месторождений подземных вод.

ОХРАНА ИСКУССТВЕННО СОЗДАННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Охрана подземных вод от загрязнений в условиях длительной их эксплуатации на водозаборных участках имеет для практики первостепенное значение. Эта новая проблема современной гидрогеологии включает следующие, тесно связанные между собой основные разделы:

1) гидрогеологическое обоснование и организация зон санитарной охраны непосредственно на участках действующих водозаборов;

2) гидрогеологические основы охраны собственно источника искусственного питания подземных вод от возможного загрязнения;

3) комплексные исследования по охране качества искусственно созданных запасов подземных вод;

4) рекомендация мероприятий по защите подземных вод от загрязнений.

Конечной целью проблемы охраны является прогноз возможного изменения качества подземных вод в процессе длительной их эксплуатации в условиях искусственного восполнения.

Рассмотрим кратко содержание выделенных основных разделов проблемы.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ

Общие задачи гидрогеологических исследований по охране подземных вод как источника водоснабжения от загрязнений четко определяются «Основами водного законодательства СССР и союзных республик» (1970 г.). Этот закон строго регламентирует рациональное использование водных ресурсов и их охрану от загрязнений и истощения. С целью проведения постоянного и планомерного межведомственного контроля за использованием водных ресурсов в нашей стране создано 149 бассейновых инспекций Минводхоза СССР.

В соответствии с требованиями «Основ водного законодательства СССР и союзных республик» весь комплекс исследований и осуществление инженерных мероприятий по предотвращению возможного загрязнения пресных подземных вод на водозабор-

ных сооружениях возлагается на ведомства, в чьем ведении находится их эксплуатация.

Наряду с этим согласно действующему постановлению «Об усилении охраны окружающей среды и рациональном использовании природных ресурсов» (1972 г.) на организации Мингео СССР возложены функции контроля за рациональным их использованием и охраной. Это положение представляет геологическим организациям широкие права контроля, вплоть до запрещения эксплуатации действующих водозаборов (если водопотребляющее ведомство систематически не выполняет предписание контрольных органов по охране подземных вод от загрязнений).

Объемы и содержание мероприятий по охране подземных вод в каждом конкретном случае определяются гидрогеологической и санитарно-гигиенической сложностью района расположения действующего водозабора.

Согласно действующей в СССР «Инструкции по установлению зон санитарной охраны хозяйственно-питьевых водопроводов с подземным источником водоснабжения» (№ 219—56), на каждом водозаборном сооружении должны быть созданы два пояса зоны санитарной охраны: зона строгого режима эксплуатации подземных вод и зона строгого ограничения (второй санитарный пояс).

Зона строгого режима обычно охватывает на водозаборе непосредственно участок расположения эксплуатационных скважин. При этом требуется более тщательный выбор площади зоны при эксплуатации прежде всего грунтовых вод — первого от поверхности водоносного горизонта. Именно первый от поверхности водоносный горизонт слабо защищен от возможного проникновения загрязнений.

Согласно требованиям Инструкции (№ 219—56) при эксплуатации напорных вод артезианского типа зона строгого режима вокруг водозабора должна иметь радиус не менее 30 м, а при эксплуатации грунтовых вод не менее 50 м. Зона строгого режима (зона отчуждения) обычно имеет ограждения и постоянную охрану.

Границы зоны строгого ограничения (второго санитарного пояса) действующей инструкцией не регламентируются. В каждом конкретном случае ее контуры определяются гидрогеологическими условиями и прежде всего прогнозной оценкой площади возможного распространения депрессионной воронки при длительной эксплуатации подземных вод. Второй санитарный пояс полностью включает границы области «захвата» водозаборных скважин, а также контуры прилегающих площадей возможного изменения граничных условий фильтрационного потока в плане в процессе водоотбора (для условий нестационарного режима).

При составлении отчета по результатам разведки и оценки запасов подземных вод геологическими организациями обычно представляются предварительные соображения по обоснованию

зон санитарной охраны. В связи с этим для выделения площади второго санитарного пояса на участке проектируемого или действующего водозабора целесообразно выполнить предварительные аналитические расчеты развития воронки депрессии или определить путем расчета области «захвата» водозабора.

Методические приемы определения границ второго пояса санитарной охраны достаточно детально изложены в работе Е. Л. Минкина (1967).

Оценка границ зон санитарной охраны может быть обоснованной только тогда, когда хорошо изучены гидрогеологические условия выделенной площади, выявлена степень ее однородности и достаточно достоверно изучены условия защищенности подземных вод от возможных загрязнений.

При эксплуатации грунтовых вод, слабо защищенных от возможного проникновения загрязнений с поверхности, требования к организации зон санитарной охраны должны быть более строгими. При этом необходимо обратить внимание на организацию и выделение площади второго пояса санитарной охраны.

В этом отношении определенное предпочтение имеют гидрогеологические условия длительной эксплуатации напорных подземных вод, особенно глубоко залегающих от дневной поверхности. Глубоко залегающие водоносные горизонты напорных подземных вод имеют естественную герметичность. С поверхности они надежно защищены глинистыми водонепроницаемыми породами и поэтому требования к организации и выделению по площади границ площади второго пояса санитарной охраны могут быть несколько снижены.

Однако в случае сложного гидрогеохимического разреза водоносного комплекса напорных вод могут усложниться условия выделения второго пояса санитарной охраны в вертикальном разрезе. Если продуктивный водоносный горизонт пресных подземных вод подстилается подземными водами высокой минерализации, необходимо предварительными гидродинамическими расчетами обосновать рациональные условия эксплуатации и разработать мероприятия, предотвращающие возможное загрязнение пресных вод на водозаборном участке за счет внедрения в скважины вод высокой минерализации.

Особое внимание следует обратить на изучение условий организации зон санитарной охраны, когда на разведанной площади известны действующие очаги возможного загрязнения подземных вод. В этом случае в завершающую стадию разведки месторождения подземных вод целесообразно составить прогнозную гидрогеологическую схему водозаборного участка, на которой необходимо отразить границы рассчитанных зон санитарной охраны и контуры существующих очагов загрязнений. Схема должна быть иллюстрирована гидрогеологическими разрезами.

Такой предварительный гидрогеологический анализ позволит решить вопрос о необходимости проведения аналитических рас-

четов для прогнозной оценки времени возможного продвижения контура загрязнений к водозаборному участку, а также величины допустимой концентрации загрязнения.

При общей оценке санитарно-гигиенических условий разведочного участка и выделения зон санитарной охраны очень важное значение имеет вещественный состав возможных загрязнений подземных вод. Различные виды загрязнений по-разному проявляют себя при миграции в подземных водах и требуют различные меры предосторожности. Можно отметить два вида загрязнений пресных подземных вод на участке их эксплуатации: бактериальное и химическое.

Под загрязнением пресных подземных вод следует понимать ухудшение их качества при эксплуатации под влиянием процессов проникновения в продуктивный горизонт вредных бактериальных или химических компонентов в количестве, превышающем допустимые нормы по действующим ГОСТам.

Бактериальную загрязненность подземных вод принято оценивать по присутствию в них кишечной палочки, а показателем степени санитарного состояния подземных вод является коли-титр. Химическое загрязнение оценивается непосредственно по количеству содержащихся в подземных водах вредных компонентов.

Основными источниками бактериального загрязнения пресных подземных вод являются поля фильтрации фекальных стоков, стоки из скотных дворов. Для борьбы с бактериальным загрязнением пресных подземных вод на водозаборном участке в настоящее время применяется ряд радикальных средств (хлорирование, биологические фильтры и др.). Однако есть отдельные разновидности бактерий, которые могут существовать и развиваться в подземных водах довольно продолжительное время. Эти биологические особенности необходимо знать и учитывать при оценке зон санитарной охраны. Поэтому целесообразно санитарно-бактериологические обследования участка водозабора и оценку его санитарного состояния проводить совместно со специалистами сантехнадзора.

Наиболее сложным и трудноустраняемым является химическое загрязнение пресных подземных вод (органического и неорганического происхождения). При этом наиболее опасны токсичные химические соединения.

Очагами химического загрязнения подземных вод могут служить промстоки промышленных и сельскохозяйственных предприятий, их искусственные накопители, а также зараженность поверхностных вод, которые, как правило, имеют тесную гидравлическую связь с подземными водами.

Нередко химическое загрязнение подземных вод происходит из-за слабой гидрогеологической изученности водозаборного участка и прилегающих площадей. Так, например, в районе действующего водозабора было принято решение устроить на поверхности накопитель промстоков завода. Решение принято на том

основании, что продуктивный горизонт, подземные воды которого используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения, изолируется от поверхности горизонтом непроницаемых глин. Фактически горизонт глин по простиранию местами размыт и проточки из накопителя профильтровались через гидрогеологические «окна» в продуктивный горизонт (рис. 65). В результате пришлось срочно разведывать новый водозаборный участок.

Сложность борьбы по восстановлению качества подземных вод, подверженных химическому загрязнению, состоит в том, что многие химические компоненты очень устойчиво ведут себя в под-

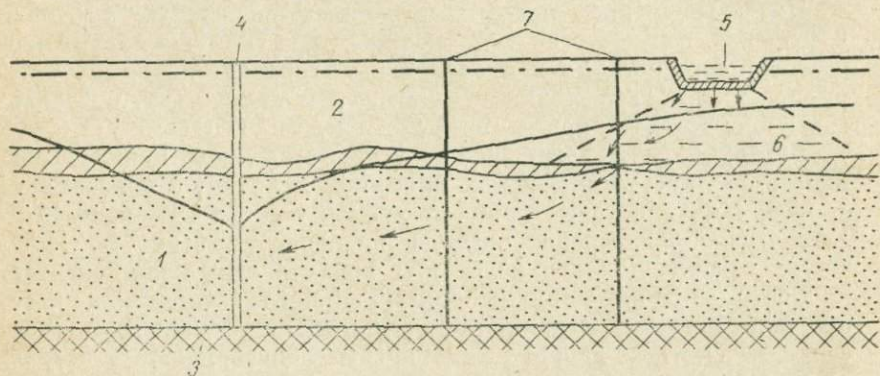


Рис. 65. Схематический гидрогеологический разрез участка химического загрязнения подземных вод.

1 — водоносные пески; 2 — покровные образования; 3 — глинистые породы; 4 — водозаборная скважина; 5 — бассейн — накопитель проточков; 6 — куполообразное распространение движения загрязнений; 7 — наблюдательные скважины. Стрелками показаны направления движения загрязнений

земных водах и способны мигрировать на большие расстояния, не разлагаясь и не окисляясь (фенол, фтор, хром, пестициды и др.), а также в том, что процесс восстановления качества является очень длительным во времени. Поэтому необходимо на всех действующих водозаборных сооружениях предпринимать действенные меры по предупреждению возможного химического загрязнения подземных вод хозяйственно-питьевого потребления.

Своевременное решение вопросов об охране качества пресных подземных вод можно осуществить на базе стационарного изучения режима эксплуатации водозабора. Наиболее кординальное решение предупредительных мер охраны качества пресных подземных вод на будущем водозаборе может быть получено на основе результатов разведочных работ. Именно в процессе разведки месторождения должны быть организованы режимные наблюдения, изучены санитарно-гидрогеологические условия, возможные источники загрязнения и реальные пути миграции химических загрязнений в продуктивный водоносный горизонт.

В общий комплекс мероприятий по охране подземных вод

от возможных загрязнений входит и периодическое обследование территории водозаборного сооружения. В процессе длительной эксплуатации подземных вод на площади влияния водозабора происходят коренные изменения гидрогеологических условий (изменяются условия взаимосвязи подземных и поверхностных вод) дренирование влаги не только части продуктивного водоносного горизонта, но и вышележащих пород, осушение заболоченных участков и др. Могут произойти изменения и санитарных условий на прилегающих площадях.

Поэтому в процессе длительной эксплуатации водозаборных сооружений в порядке профилактики, контроля и ревизии данных разведки целесообразно периодически проводить рекогносцировочные санитарное и гидрогеологическое обследования. При этом рекомендуется не только проводить визуальное обследование площади второго пояса санитарной охраны и прилегающих территорий, но и выполнять разовые качественные опробования подземных и поверхностных вод.

Результаты рекогносцировочных обследований необходимо систематически отражать на дежурной гидрогеологической карте, а результаты качественного опробования вод отражать на сводных графиках. Такие сводные графики позволят установить динамику возможных изменений качества поверхностных и подземных вод на площади второго санитарного пояса и прилегающих территорий.

Особое внимание при таких обследованиях должно быть обращено на изучение существующих вблизи водозаборных сооружений очагов химического или бактериального загрязнений (накопителей промстоков, хвостохранилищ, полей орошения и др.). В таких условиях бурение специальных наблюдательных гидрогеологических скважин и организацию стационарных режимных наблюдений следует рассматривать как профилактические мероприятия по охране пресных подземных вод от возможных загрязнений.

Сеть наблюдательных скважин целесообразно располагать от очага загрязнений в сторону водозаборного сооружения по профилям с таким расчетом, чтобы иметь достоверные гидрогеологические данные для построения карт гидроизогипс. Такие карты вместе с данными химического опробования позволят в натуре одевить скорость продвижения контура загрязненных подземных вод и в случае необходимости принять необходимые меры по предотвращению ухудшения качества источника хозяйственно-питьевого водоснабжения.

По охране подземных вод от загрязнений можно также рекомендовать изучение материалов по опыту эксплуатации других водозаборных сооружений, работающих в аналогичных гидрогеологических и санитарно-бактериологических условиях, с целью использования этого опыта для прогнозной оценки качества подземных вод на исследуемом объекте.

В зависимости от конкретных гидрогеологических и санитарных условий рекогносцировочные обследования на площади действующего водозабора можно проводить один или два раза в год.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОХРАНЕ ИСТОЧНИКА ИСКУССТВЕННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

При искусственном воспроизводстве и магазинировании подземных вод требуется тщательная качественная подготовка источника питания — поверхностных вод рек, озер, водохранилищ, временно действующих потоков. При длительном искусственном восполнении ресурсов и запасов подземных вод требуется не только тщательная подготовка поверхностных вод, но и в некоторых случаях организация охраны их от возможного первичного загрязнения.

С этой целью, когда каптажное сооружение источника искусственного питания находится в значительном удалении от водозабора подземных вод, требуется создание дополнительных зон санитарной охраны. Эти зоны должны охватывать площадь расположения всего комплекса сооружений по искусственному воспроизводству запасов от головного каптажа до инфильтрационных сооружений различного типа.

При искусственном питании подземных вод целесообразно пересмотреть наше представление о том, что считать в данном случае «водозаборным сооружением».

Учитывая требования ГОСТов (по обеспечению высокого качества подземных вод как источника хозяйственно-питьевого водоснабжения и к охране этого источника от возможных загрязнений), к понятию водозаборного сооружения при искусственном восполнении целесообразно подходить комплексно, подразумевая под этим совокупность всех видов инженерных сооружений на участке эксплуатации. К комплексу водозабора целесообразно отнести следующие основные сооружения:

- а) головное сооружение по каптажу собственно поверхностных вод (из реки, озера, водохранилища и др.);
- б) водовод и отстойные (очистные) сооружения сырой воды;
- в) инфильтрационные сооружения открытого и закрытого типов или огражденную в пойменной части реки территорию для периодической площадной инфильтрации паводковых вод;
- г) собственно водозаборное сооружение (буровые скважины, каптажные галереи, водоводы), а также насосные станции первого и второго подъемов.

С этих позиций и целесообразно подходить комплексно к оценке необходимых мероприятий по охране качества источника искусственного восполнения.

В законодательных санитарных органах здравоохранения разрабатывается проект официальных требований к установлению зон санитарной охраны при эксплуатации подземных вод с искус-

ственным их питанием, которые послужат основой новой инструкции. В действующих в настоящее время временных указаниях по эксплуатации систем искусственного восполнения запасов подземных вод с инфильтрационными бассейнами по существу приводятся только требования к оценке качества сырой воды, подаваемой в инфильтрационные сооружения. В ней не излагаются требования по организации зон санитарной охраны.

Ниже приведены некоторые соображения по охране качества источника искусственного питания. Очевидно (как и в предыдущем случае), для охраны качества источника искусственного питания целесообразно организовать две зоны санитарной службы.

Первая зона строгого режима непосредственно на участках водозаборных скважин должна быть единой, в пределах которой должна быть ограждена вся площадь расположения поверхностных инфильтрационных сооружений. В зону строгого режима следует включить площадь пойменной террасы реки, специально подготовленную для периодической инфильтрации паводковых вод на площади влияния водозабора.

На участках отстойных или очистных сооружений, расположенных обычно в некотором удалении от водозаборных скважин, а также на головном каптажном сооружении и трассе безнапорного водовода или канала, очевидно, потребуются создание самостоятельной санитарной зоны строгого режима.

Сложнее на объектах искусственного питания разработать, хотя бы в общем виде, рекомендации по организации второго пояса санитарной охраны сырой воды. Выбор границ второго пояса санитарного режима в этом случае зависит от многих факторов, характеризующих местные условия изучаемого объекта.

В этом отношении представляют большой интерес исследования, проведенные Институтом общей и коммунальной гигиены им. А. Н. Сысина Академии медицинских наук СССР. Результаты исследований показали, что выбор технологической схемы искусственного воспроизводства подземных вод на водозаборных сооружениях и разработка предупредительных мероприятий по охране источника питания от загрязнений должны производиться с учетом результатов работ по изучению самоочищающей способности пород фильтрующего слоя на приемных сооружениях, характера исходного загрязнения сырой воды и ее качества, расстояния от контура питания до водозаборных скважин, санитарного состояния территории головного сооружения, а также по трассе транспортировки сырой воды к инфильтрационным сооружениям.

Источник искусственного питания подземных вод — поверхностные воды всегда имеют различный химический состав и степень минерализации и нередко являются загрязненными. Кроме того, поверхностные водотоки (постоянно или временно действующие) и водоемы (естественные или искусственные) всегда имеют самые различные санитарно-бактериологические условия.

Все это должно учитываться в каждом конкретном случае при обосновании и выборе площади второго пояса санитарной охраны на объектах искусственного восполнения.

В нашей стране в практике работ некоторых водозаборных сооружений с искусственным питанием второй санитарный пояс охватывает довольно большие площади. И это себя оправдывает и обеспечивает необходимое качество сырой воды.

К факторам, определяющим выбор границ второго пояса санитарной охраны, можно также отнести: а) степень санитарной и химической защищенности территории расположения инженерных сооружений по искусственному питанию подземных вод; б) условия взаимосвязи поверхностных и подземных вод; в) наличие потенциальных источников загрязнений поверхностных вод и др.

Важную роль в оценке санитарного состояния речного бассейна играет режим поверхностного речного стока.

Благоприятные санитарные условия на реках формируются тогда, когда в межень расходы поверхностных вод спадают до минимальных годовых значений, скорость течения воды незначительная и мутность ее резко уменьшается. В период прохождения бурных весенних паводков и разлива рек в значительной степени увеличивается мутность воды, ухудшается санитарное состояние, так как паводковые потоки при разливе могут захватывать и размывать накопившиеся в зимнее время на различных участках долины различные очаги загрязнений.

Особенно бурно протекают весенние паводки в реках горных районов СССР. Реки в европейской части СССР в весеннее время очень широко разливаются, затопляя нередко большие площади молодых террас.

Весьма неравномерный и ежегодно изменяющийся режим поверхностного стока наблюдается в малых горных реках, в которых поверхностные воды существуют периодически (только в период выпадения весенних дождей). Режим стока в малых реках целиком зависит от интенсивности выпадения весенних атмосферных осадков. Во многих случаях при благоприятных геологических условиях весной на малых реках могут формироваться селевые потоки, которые могут не только ухудшить санитарное состояние участка водозабора, но и привести к разрушению некоторых инженерных сооружений, созданных для искусственного питания подземных вод.

Таким образом, гидрологический режим источника, выбранного для искусственного восполнения запасов подземных вод, во многих случаях является важным фактором в выборе границ второго пояса санитарной охраны инженерных сооружений. Все это рекомендуется учитывать при оценке санитарной безопасности длительной эксплуатации подземных вод, запасы которых формируются искусственным путем.

Значительно упрощаются условия организации второго пояса

охраны источника искусственного питания от загрязнений, если для этого используются поверхностные воды озер или водохранилищ. Озеро или водохранилище сами по себе уже являются накопителями поверхностных вод, и их можно рассматривать при искусственном питании подземных вод как сооружения по предварительной подготовке сырой воды. Границы второго пояса в этом случае определяются санитарными условиями водоёма.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОХРАНЕ КАЧЕСТВА ИСКУССТВЕННО СОЗДАНЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

При искусственном воспроизводстве эксплуатационных запасов подземных вод за счет использования поверхностных вод на водозаборных участках необходимо проводить комплекс специальных исследований по обеспечению их качества. В этот комплекс рекомендуется включить гидрогеологические, гидрогеохимические, гидрологические, физико-химические и санитарно-бактериологические исследования. Исследования должны проводиться в двух направлениях: с целью обоснования организации зон санитарной охраны и с целью прогнозной оценки возможного изменения качества подземных вод непосредственно в пластовых условиях при длительной их эксплуатации.

Основные рекомендации по содержанию и методике гидрогеологических и санитарно-бактериологических исследований для обоснования зон санитарной охраны изложены выше. Исследование по прогнозной оценке возможного изменения качества подземных вод в процессе их длительной эксплуатации является новым направлением в гидрогеологии, охватывающим по существу два научно-прикладных аспекта: а) прогноз возможного ухудшения качества пластовых вод, которое может произойти под влиянием естественных факторов, и б) оценку условий миграции искусственного загрязнения, так или иначе попавшего в продуктивный водоносный горизонт, и влияние этого загрязнения на возможное изменение качества подземных вод.

В первом случае ухудшение качества пластовых вод на водозаборе может произойти под влиянием, например, внедрения в процессе длительной эксплуатации минерализованных вод (снизу или с фронта потока).

В таких гидрогеологических условиях охрану качества подземных вод можно регулировать рациональным режимом эксплуатации водозабора. Для решения этой задачи на водозаборном участке должна быть организована стационарная сеть наблюдательных скважин для изучения режима эксплуатации. Наблюдательные выработки при этом должны быть расположены не только в продуктивном горизонте, но и на площади распространения минерализованных вод.

Гидрогеологическая и гидрогеохимическая информация по изучению режима могут служить надежной основой для гидродинамических расчетов — рациональных условий эксплуатации, а также для принятия ряда предупредительных мер по предотвращению возможного внедрения в продуктивный горизонт минерализованных вод (защита методом периодической эксплуатации спаренных водозаборов, создание на пути внедрения завес из нагнетательных скважин пресной воды и др.).

Во втором случае химическое загрязнение подземных вод на водозаборном участке может произойти под влиянием техногенных причин (прорыв промстоков из накопителей, площадное загрязнение подземных вод на массивах орошения под влиянием ядохимикатов и др.). В таких случаях возникают очень сложные условия охраны подземных вод продуктивного горизонта от загрязнений.

Для изучения процессов миграции загрязнений в подземных водах в ряде опубликованных работ используются основные положения теории массопереноса. Это направление исследований в гидрогеологии является перспективным. Однако приложение теории массопереноса к оценке условий миграции химических загрязнений в пластовых условиях вызывает большие трудности. Они определяются литологической, сорбционной и фильтрационной неоднородностью пластовых условий, в которых протекают процессы миграции загрязнений. Ф. М. Бочев (1972) совершенно справедливо отмечает, что «Для таких течений аналитические решения задач о миграции загрязнений практически получить не представляется возможным и приходится прибегать к приближенным методам».

В пластовых условиях при миграции химических загрязнений всегда протекают процессы взаимодействия: а) между жидкими фазами — подземными водами и загрязненными растворами (обычно это промстоки) и б) между загрязненными растворами и горными породами. Эти процессы характеризуются гидродинамическими и физико-химическими параметрами — водопроницаемостью фильтрующих пород, скоростью гравитационной и диффузионной фильтрации потока, сорбционной способностью горных пород поглощать загрязняющие компоненты, активной пористостью пород и др.

Изучение опыта эксплуатации подземных вод показывает, что наиболее опасными являются такие условия, при которых химическое загрязнение попадает в зону «захвата» водозаборного сооружения. Зона захвата водозабора определяется такой областью общего фильтрационного потока, в которой линии тока направлены непосредственно к каптажным скважинам. В гидрогеологическом отношении она четко ограничивается так называемой «нейтральной линией» тока (рис. 66).

При стационарном режиме фильтрации, для которого и производятся расчеты области «захвата», нейтральная граница воз-

мущенного потока остается постоянной во времени. При неустановившемся режиме фильтрации эта граница во времени и пространстве может постоянно перемещаться. Как известно, весь поток подземных вод между нейтральной границей и водозабором непосредственно направлен в эксплуатационные скважины. За пределами нейтральной точки поток «проскакивает», минуя водозаборное сооружение.

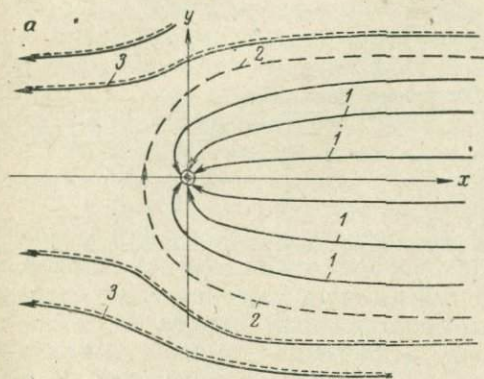


Рис. 66. Схема для оценки «области захвата» водозаборного сооружения.

a — план; *б* — разрез. 1 — гидроизогипсы «области захвата»; 2 — нейтральная линия; 3 — гидроизогипсы потока вне «области захвата»; 4 — водоносные пески; 5 — глины; 6 — почвенный покров; 7 — уровень грунтовых вод до эксплуатации водозабора; 8 — депрессионная воронка

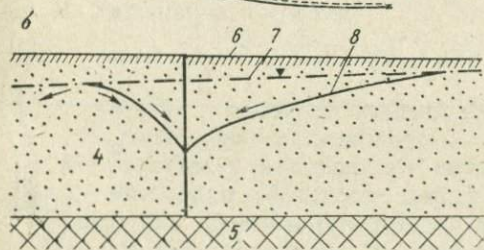
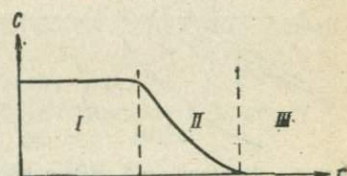


Рис. 67. График зависимости концентрации от расстояния.

I, II, III — гидрохимические зоны



Таким образом, для оценки возможного ухудшения качества подземных вод под влиянием искусственного загрязнения необходимо прежде всего определить на водозаборном участке область «захвата» возмущенного фильтрационного потока. Аналитическое решение для построения зоны «захвата» водозаборного сооружения достаточно подробно изложено в ряде опубликованных работ (Е. Л. Минкин, Ф. М. Бочев, В. Д. Бабушкин и др.).

При сложных граничных условиях оценку воздействия водозаборных скважин на поток целесообразно производить с помощью моделирования на АВМ. Учитывая, что на водозаборном участке всегда создается режимная сеть наблюдательных скважин, область «захвата» водозабора может быть довольно четко определена непосредственно по результатам натуральных исследований путем построения детальной карты гидроизогипс.

Рассматривая основные положения теории миграции загрязненных протокков в подземных водах, Ф. М. Бочев (1972)

отмечает, что при фильтрации промстоков из очагов их накопления в радиальном потоке (например, в сфере захвата водозаборного сооружения) образуются три гидрогеохимические зоны. Различаются они по степени химического загрязнения (рис. 67).

В ближайшей к очагу первой зоне подземные воды имеют максимальную химическую загрязненность и концентрация химических компонентов достигает здесь своего максимального

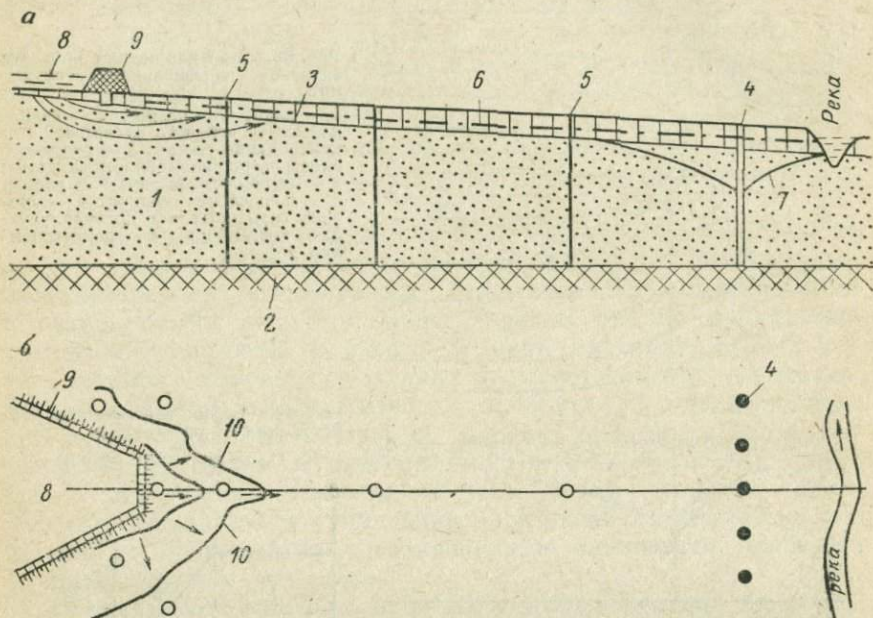


Рис. 68. Схематический план и разрез участка загрязнения подземных вод от потока в накопителе промстоков.

а — разрез; б — план. 1 — пески; 2 — глины; 3 — покровные суглинки; 4 — водозаборные скважины; 5 — наблюдательные скважины; 6 — уровень грунтовых вод до эксплуатации; 7 — депрессионная воронка; 8 — накопитель; 9 — дамба; 10 — контур продвижения загрязнения. Стрелками показаны направления движения загрязнений

значения. Можно предположить, что эта концентрация по своему значению будет близка к первоисточнику загрязнений — очагу их накопления.

В удалении от очага загрязнения в фильтрационном потоке будет формироваться третья зона, где в подземных водах и во вмещающих породах еще нет влияния загрязнений. Между первой и третьей зонами будет размещаться вторая — переходная, или смешанная, зона. Во второй зоне в результате дисперсии будет происходить смешение чистых и загрязненных подземных вод.

Если от очага будут непрерывно поступать в подземные воды загрязнения, то фронт потока с тремя отмеченными зонами будет постепенно перемещаться по направлению фильтрационного потока, т. е. в сторону водозаборных скважин (рис. 68). В таких

условиях защита качества подземных вод на водозаборном участке сводится к решению двух гидродинамических задач — определению времени продвижения фронта загрязненного потока и определению возможной (допустимой) концентрации токсичных компонентов в подземных водах.

Первая задача в упрощенном виде может быть решена для расчетной схемы «поршневого вытеснения», в которой главным действующим фактором принимается конвективный перенос загрязнения в фильтрационном потоке. Объясняется это тем, что на водозаборном участке при интенсивной эксплуатации искусственно создаются относительно большие скорости фильтрации. Поэтому в миграции химических загрязнений основное значение будет иметь конвективный перенос вещества.

Рассмотрим приближенное решение задач для двух наиболее характерных гидрогеологических условий.

Для линейного ряда взаимодействующих и примерно равнодебитных скважин, расположенных в неограниченном водоносном горизонте на равных расстояниях друг от друга (рис. 69), время начала подтягивания загрязнений со стороны первоначального положения границ раздела (пресных вод с загрязнением) приближенно можно определить по следующему выражению (В. М. Гольдберг, 1975 г.):

$$T = \frac{2n_0hl}{Q\pi} \left(\frac{\pi x_1}{l} - 0,7 \right), \quad (\text{XII.1})$$

где Q — дебит отдельной взаимодействующей скважины линейного ряда водозабора;

h — мощность водоносного горизонта;

n_0 — активная пористость пород продуктивного горизонта.

Остальные обозначения приведены на рис. 69.

Приведенное уравнение действительно при $x_1/l \geq 0,5$.

Расчетная схема на рис. 69 отвечает таким гидрогеологическим условиям, когда водозаборное сооружение располагается на площади артезианского бассейна.

На рис. 70 приведена схема к расчету времени подтягивания загрязнения в полуограниченном пласте. Этой схеме отвечают, например, условия инфильтрационного водозабора, расположенного в долине реки. Время начала подтягивания к водозабору фронта загрязненных вод от очага их распространения на террасовой поверхности можно определить по следующему выражению (В. М. Гольдберг, 1975 г.):

$$T = \frac{n_0hl}{Q} \frac{1}{\text{sh} \frac{2\pi b}{l}} \left[\frac{l}{2\pi} \left(\text{sh} \frac{2\pi y}{l} - \text{sh} \frac{2\pi b}{l} \right) - (y - \alpha) \text{ch} \frac{2\pi b}{l} \right], \quad (\text{XII.2})$$

где Q — дебит отдельной взаимодействующей скважины линейного ряда водозабора, для которой производится определение;

- b — расстояние линейного ряда скважин от реки;
 l — расстояние между скважинами;
 y — расстояние от реки до контура загрязненных вод.

Применение указанной выше расчетной зависимости требует выполнения следующих условий: а) линейный ряд скважин на водозаборе имеет сравнительно большую протяженность; б) дебиты водозаборных скважин являются одинаковыми; в) гидравлическая связь подземных вод с рекой хорошая, поэтому дебит водозаборных скважин обеспечивается преимущественно за счет береговой инфильтрации поверхностных вод; г) расстояние между скважинами в линейном ряду одинаковое.

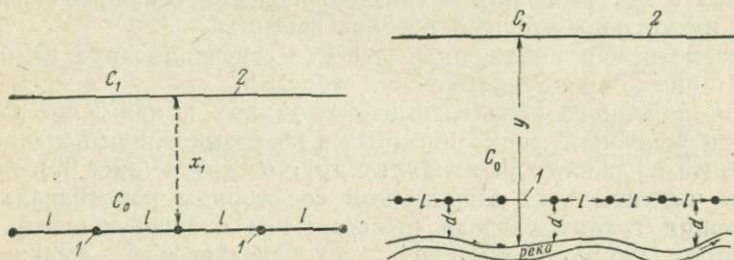


Рис. 69. Схема для расчета времени продвижения загрязнений.

1 — линейный ряд водозаборных скважин; 2 — контур загрязненных подземных вод с концентрацией C_1 .

Рис. 70. Схема для расчета времени продвижения загрязнений для условий полуограниченного пласта.

1 — линейный ряд водозаборных скважин; 2 — контур загрязненных подземных вод с концентрацией C_1 .

Если дебиты водозаборных скважин и расстояния между скважинами не одинаковы, то в расчетах допускается принимать их среднее значение.

В практике организации искусственного воспроизводства запасов подземных вод могут сложиться такие условия, когда угроза загрязнения возникает со стороны очага нагнетания протоктов. При формировании нестационарного режима фильтрации потока на действующем водозаборе такие условия могут сформироваться в результате длительной эксплуатации подземных вод. Тогда время продвижения контура загрязнений по потоку от места его нагнетания к водозаборному сооружению можно определить по уравнению Тейса (Шестаков, 1973)

$$t = \frac{n_0 m}{q_0} \left[l_n - \frac{Q}{2\pi q_0} \ln \left(1 + \frac{2\pi q_0}{Q} l_n \right) \right], \quad (\text{XII.3})$$

где l_n — произвольно заданное расстояние от очага нагнетания до выбранной точки вниз по потоку, для которой определяется время продвижения контура загрязнения;
 n_0 — активная пористость пород продуктивного горизонта;
 m — мощность продуктивного водоносного горизонта;

Q — расход нагнетания промстоков;

q_0 — единичный расход естественного потока.

Для прогнозной оценки возможного изменения качества подземных вод необходимо не только изучить расстояние и время продвижения контура загрязненных вод, но и определить возможную концентрацию вредных компонентов после смешения вод продуктивного горизонта с загрязнением.

В том случае, если загрязненные флюиды по сравнению с пресными водами продуктивного горизонта имеют более высокую минерализацию и распространены на большей площади влияния водозабора, прогнозную оценку возможного изменения общей минерализации подземных вод можно выполнить по следующему уравнению (для линейного водозабора в неограниченном пласте):

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arctg \sqrt{\frac{l^{bt} l^{bT}}{l^{bt} - 1}} \quad (\text{XII.4})$$

где C_0 — минерализация подземных вод продуктивного горизонта;

C_1 — минерализация загрязненных подземных вод;

T — время начала подсоса загрязненных вод, определяемое по формуле (XII.1);

t — расчетный момент времени, для которого определяется минерализация воды в водозаборных скважинах;

$b = Q\pi / hn_0 l^2$.

Выражение (XII.4) можно использовать при условии, если $t > T$, т. е. на момент времени после начала подтягивания загрязненных вод. Предельная минерализация подземных вод на водозаборе через достаточно большой промежуток времени ($t \gg T$) после подтягивания загрязнений согласно выражению (XII.3) будет

$$C_{\max} = \frac{C_1 + C_0}{2}, \quad (\text{XII.5})$$

т. е. равна полусумме минерализаций пресных и загрязненных подземных вод.

Уравнение (XII.4) можно также использовать для приближенной оценки минерализации смешанных вод и для условий линейного ряда инфильтрационного водозабора, когда подтягивание загрязненных вод наблюдается со стороны террасовой поверхности реки. При этом время начала подсоса загрязненных вод следует определять по формуле (XII.2).

Итак, для охраны подземных вод от загрязнений на водозаборном участке и принятия необходимых мер по защите качества источника водоснабжения необходимо решить вопрос о возможном проникновении обнаруженных загрязненных вод к действующим или проектируемым водозаборами. Для этого по площади влияния водозабора должна быть построена карта линий тока возбужденного потока для определения положения

Основные виды исследований с целью охраны качества подземных вод при их искусственном питании и использовании для хозяйственно-питьевого водоснабжения

Основные виды работ	Целевое назначение	Краткий перечень основных работ
Период разведки		
1. Комплексные исследования (гидрологические, гидрогеологические, санитарно-гигиенические)	Обоснование зон санитарной охраны водозаборного сооружения и источника искусственного питания	1. Рекогносцировочное обследование района водозабора и источника искусственного питания 2. Бурение наблюдательных скважин 3. Комплексное качественное опробование подземных вод (химическое и санитарно-бактериологическое) в скважинах, колодцах, родниках, реках
2. Камеральная обработка материалов комплексных исследований	Оценка условий организации зон санитарной охраны	1. Обобщение и анализ собранных материалов 2. Аналитическая оценка зоны «захвата» водозаборного сооружения 3. Рекомендации по проекту организации зон санитарной охраны на водозаборном участке и на участке каптажа источника искусственного питания подземных вод
3. Стационарные наблюдения за режимом подземных вод и источника их искусственного питания	Изучение режима и в первую очередь режима качества подземных вод	1. Стационарные наблюдения за режимом подземных вод и источника искусственного питания 2. Камеральная обработка материалов 3. Рекомендации по охране качества подземных вод
Период эксплуатации подземных вод		
1. Комплекс стационарных наблюдений за режимом подземных вод и источника их искусственного питания	С целью обоснования мероприятий по охране качества подземных вод при длительной их эксплуатации	1. Стационарные наблюдения за режимом уровня, температурой, химическим, санитарно-бактериологическим составом подземных вод 2. Бурение дополнительных наблюдательных скважин 3. Камеральная обработка материалов с целью обобщения и анализа данных по режиму подземных вод
2. Комплексное рекогносцировочное обследование	С целью контроля условий охраны подземных вод и источника их искусственного питания	1. Рекогносцировка районов водозаборного сооружения и каптажа источника искусственного питания подземных вод

Основные виды работ	Целевое назначение	Краткий перечень основных работ
		2. Контрольное качественное опробование подземных вод и поверхностных вод 3. Камеральная обработка материалов, составление дежурной карты, отражающей условия охраны качества подземных вод 4. Разработка дополнительных мероприятий по охране качества подземных вод и источника их искусственного питания

в пространстве нейтральной или «водораздельной» линии. Как отмечалось выше, нейтральная линия тока ограничивает в плане область «захвата» водозабора.

Такой методический прием позволяет однозначно оценить опасность возможного проникновения загрязнений. Если обнаруженный очаг загрязнения подземных вод располагается за пределами области «захвата» водозабора, то для стационарного режима фильтрации потока никакой опасности возможного внедрения загрязнений нет. При таких гидродинамических условиях загрязнения проникнуть к водозаборным сооружениям не могут. Мероприятия по охране качества подземных вод на водозаборном участке будут носить профилактический характер.

Если при построении гидродинамической сетки фильтрационного потока обнаруженный очаг загрязнений окажется в пределах площади «захвата» водозабора, то проникновение загрязнения к водозаборным скважинам является неизбежным. При этом вопрос только во времени продвижения фронта загрязнения к каптажным скважинам и в возможной концентрации в пресных подземных водах вредных компонентов.

В этих случаях «возникает необходимость в активных мерах по ликвидации загрязнений, предотвращению их дальнейшего распространения по продуктивному водоносному горизонту и ликвидации очага загрязнений» (Бочев, 1972).

К активным формам борьбы с химическим загрязнением пластовых вод (кроме отмеченных) следует отнести ликвидацию очага загрязнения с помощью устройства дренажных завес по пути их движения. Дренажная завеса — это по существу второй дублирующий водозабор, эксплуатация которого должна обеспечить создание в депрессионной поверхности обратных уклонов

фильтрационного потока от действующего каптажного сооружения в сторону очага загрязнений.

В некоторых случаях экономически целесообразным может оказаться поиск и разведка нового водозаборного сооружения для обеспечения объекта высококачественным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения. В табл. 47 приведен перечень основных видов исследований, которые рекомендуется проводить с целью охраны качества подземных вод и источника их искусственного питания.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОЗАБОРА С ИСКУССТВЕННЫМ ПИТАНИЕМ СИСТЕМОЙ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ БАССЕЙНОВ

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В настоящей главе дается краткая характеристика опыта разведки и эксплуатации одного из крупнейших водозаборов СССР, дебит которого формируется путем искусственно создаваемых запасов подземных вод системой инфильтрационных бассейнов, куда поверхностные воды подаются из окружающих озер.

Водозабор представляет собой линейную систему взаимодействующих скважин, отбор воды из которых осуществляется сифонным способом. С 1953 г. на водозаборе применяется искусственное восполнение запасов подземных вод с помощью инфильтрационных бассейнов.

Продуктивный горизонт представлен четвертичными однородными средне- и мелкозернистыми песками мощностью 20—50 м. Горизонт подстилается моренными суглинками мощностью 1—7 м, ниже которых залегает напорный водоносный комплекс верхнедевонских отложений, преимущественно песчаников. Подземные воды гидрокарбонатные кальциевые с сухим остатком 0,2—0,3 г/л. Максимальная глубина залегания уровня вод около 8 м от поверхности.

Водозабор эксплуатируется с 1904 г. Его строительству предшествовали гидрогеологические исследования, проводимые в 1883—1889 г. под руководством А. Тима и О. Смрекера. В 1929—1933 гг. производительность водозабора достигла своей проектной мощности и суммарный отбор составлял 39—42 тыс. м³/сут.

В связи с постоянно возрастающей потребностью в хозяйственно-питьевой воде и невозможностью интенсификации водоотбора из существующих скважин в 1939 г. была построена насосная станция для подачи воды из озера непосредственно в естественные междюнные понижения в рельефе, находящиеся на расстоянии 30—50 м от водозаборных скважин, с целью искусственного подпитывания действующего каптажа. В 1949 г. на участках водозабора было начато сооружение инфильтрационных бассейнов облегченного типа и шесть из них были введены в эксплуатацию в 1953 г. Площадь бассейнов составила 30 тыс. м², общая протяженность ряда бассейнов 2 км, расстояние до водо-

заборных скважин 200—300 м. В течение 1954—1955 гг. в бассейны подавалось в среднем около 70 тыс. м³/сут, производительность водозабора при этом увеличивалась на 20 тыс. м³/сут. Таким образом, коэффициент использования инфильтруемой воды составлял около 30%. С целью увеличения общей производительности водозабора в 1956—1957 гг. были введены в действие дополнительно семь бассейнов, а в 1965 г. еще четыре бассейна.

В настоящее время в зоне активного действия системы искусственного восполнения эксплуатационных запасов действуют 17 инфильтрационных бассейнов облегченного типа с общей фильтрующей площадью около 140 тыс. м²; в постоянной эксплуатации находятся 160 скважин. Расстояние между водозаборными скважинами 10—70 м (в среднем 40 м). Длина приемной части скважин 9—22 м.

Ширина облегченных инфильтрационных бассейнов по дну составляет 20—30 м, длина 200—400 м. Глубина наполнения бассейнов поверхностной водой 1,2—1,5 м. Часть бассейнов построена в естественных понижениях рельефа. Подача воды в каждый бассейн регулируется задвижками распределительной водоводной сети. Одновременно работает не более 10—12 бассейнов. Вода из озера поступает в бассейны без предварительной механической и биохимической очистки. Мутность воды составляет 3—10 мг/л, коли-титр в пределах 0,001—4. В процессе работы бассейнов происходит кольтатация и заиление их донной части. Вследствие этого производительность бассейна со временем уменьшается. Механическая очистка ложа и откосов бассейнов производится два раза в год со снятием слоя толщиной 10—20 см. По данным исследований, проведенных Я. Я. Спрогисом, среднегодовая скорость инфильтрации воды из бассейнов составляет 1 м/сут. Мощность зоны аэрации под дном бассейнов 1—5 м. Инфильтрация воды из бассейна осуществляется без подпора.

В процессе эксплуатации всей системы было установлено, что значительная часть воды, инфильтруемой из бассейнов, дренируется озерами Южным, Центральным и Северо-Восточным (рис. 71). В целях повышения эффективности инфильтрационных сооружений в 1969—1972 гг. были выполнены детальные разведочные работы.

РАЗВЕДКА ОБЪЕКТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Определение основных гидрогеологических параметров продуктивного горизонта производилось по материалам стационарных режимных наблюдений и по данным опытных кустовых откачек.

По материалам стационарных режимных наблюдений водопроводимость и уровнепроводность рассчитывались двумя способами: индикаторным и гидродинамическим. В первом случае

использовался естественный индикатор — хлор-ион, поступающий во время нагонов из морского залива через систему водоемов.

Для расчета использован створ наблюдательных скважин между инфильтрационным бассейном № 3 и эксплуатируемыми скважинами водозабора. Определение содержания хлоридов в воде наблюдательных скважин производилось два раза в месяц после тщательной прокачки. В обычных условиях содержание хлоридов в грунтовых водах и озере Балтэзерс не превышает 40 мг/л, а во время нагонов достигает 400 мг/л.

По результатам наблюдений строились графики зависимости $C_0 = f(t)$ и $t = (x)$ и находилось время прохождения половины фиксируемой концентрации индикатора C_0 через контрольную скважину. Коэффициент фильтрации определялся по формуле

$$K = \frac{xn}{t_i}, \quad (\text{XIII.1})$$

где x — расстояние между скважинами, м;

n — активная пористость, принимаемая равной водоотдаче, доли единицы;

t — время прохождения половины фиксируемой концентрации индикатора через контрольную скважину, сут;

i — градиент потока, доли единицы.

Результаты расчетов сведены в табл. 18.

Таблица 18

Значения основных параметров

Подгоризонт	n	x , м	t , сут	$v = \frac{xn}{t}$, м/сут	K , м/сут
a	0.20	114	23	0.99	45
b	0.18	138	52	0.48	22

По значениям водопроводимости и коэффициента водоотдачи определялась урвнеспроводность пласта.

Гидродинамическим способом параметры пласта определялись для случая линейного изменения уровня воды в бассейне по данным режимных наблюдений. В качестве исходной принималась зависимость

$$a = \frac{x^2}{4\lambda^2 t}, \quad (\text{XIII.2})$$

где x — расстояние от поверхностного водоема, м;

t — время изменения уровня на величину ΔH , сут;

λ — аргумент специальной табулированной функции $R(\lambda)$.

$$R(\lambda) = 4i^2 \operatorname{erfc}(\lambda) = \frac{\Delta H(x, t)}{\Delta H(0, t)}, \quad (\text{XIII.3})$$

где $\Delta H(x, t)$ — изменение уровня грунтовых вод за время t в наблюдательной скважине на расстоянии x от поверхностного водоема;

$\Delta H(0, t) = H_p$ — изменение уровня воды в поверхностном водоеме за время t .

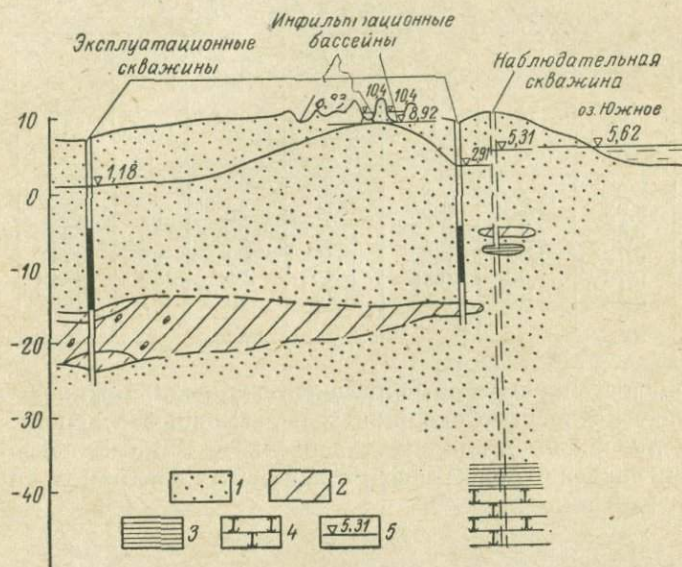


Рис. 72. Гидрогеологический разрез по линии В — Г.

1 — пески водоносные; 2 — суглинки; 3 — глина; 4 — песчаники; 5 — уровень грунтовых вод на 1975 г.

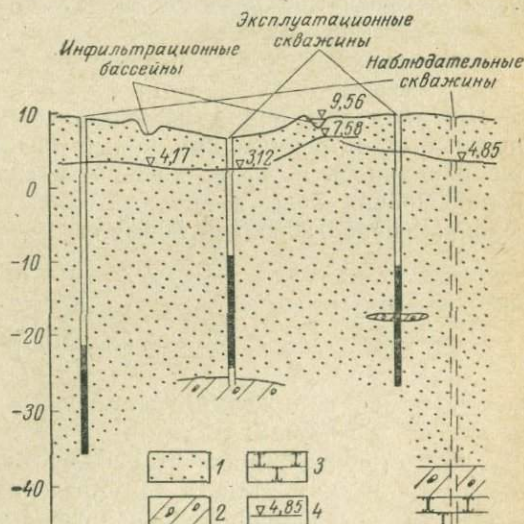


Рис. 73. Гидрогеологический разрез по линии Д — Е.

1 — пески; 2 — суглинок; 3 — песчаник; 4 — уровень подземных вод на 1975 г.

Для расчетов использовался створ наблюдательных скважин между инфильтрационными бассейнами и водозабором (рис. 72, 73). В качестве граничной принималась скв. 298. Расчет

коэффициента уровнепроводности производился в период снижения уровня воды в бассейне, когда осадки практически не наблюдались. Результаты расчета приведены в табл. 19.

Таблица 19

Исходные данные и определение коэффициента уровнепроводности продуктивного горизонта

№ наблюдательной скважины	$\Delta H(x, t)$, м	$\Delta H_{\text{стаб}}$, м	$R(\lambda)$	λ	t , сут	x , м	$x + \Delta L$	a , м ² /сут
247	0,98	1,20	0,82	0,11	20	26	58	$3,5 \cdot 10^3$
295	0,84	1,20	0,70	0,15	20	50	82	$6,8 \cdot 10^3$
248	0,77	1,20	0,66	0,18	20	82	114	$5 \cdot 10^3$
292	0,70	1,20	0,58	0,20	20	122	154	$7,5 \cdot 10^3$
249	0,48	1,20	0,35	0,42	20	157	189	$2,5 \cdot 10^3$

Сравнение параметров, определенных различными методами, показало их хорошую сходимость и возможность использования при оценке эксплуатационных запасов подземных вод.

Сопротивление ложа инфильтрационных бассейнов определялось по зависимости

$$\Delta L = L_p - L, \quad (\text{XIII.4})$$

где L_p — расчетное расстояние от опытной скважины до бассейна, м;

L — фактическое расстояние от опытной скважины до бассейна, м.

При наличии двух наблюдательных скважин, образующих опытный створ, перпендикулярный к бассейну, расчетное расстояние находилось методом подбора, исходя из фактических понижений уровня воды в наблюдательных скважинах. В качестве исходной использовалась формула

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{\ln\left(\frac{2L \pm r_2}{r_2}\right)}{\ln\left(\frac{2L \pm r_1}{r_1}\right)}, \quad (\text{XIII.5})$$

где S_1 и S_2 — понижения уровня воды в наблюдательных скважинах;

r_1 и r_2 — расстояние от наблюдательных скважин до опытной. Знак (—) справедлив для наблюдательной скважины, расположенной между опытной и бассейном; знак (+) — при расположении опытной скважины между бассейном и наблюдательной скважиной.

Результаты расчетов, проведенных по всем участкам кустовых откачек, показали, что значение ΔL является весьма незначительным и изменяется в довольно узких пределах — от 20 до 30 м. Полученные данные характеризуют хорошую гидравлическую связь поверхностных вод в бассейне и подземных вод продуктивного горизонта.

Продолжительность фильтроцикла определялась опытным путем, механическая чистка дна бассейнов производится формально два раза в год. В дальнейшем предусматривается дополнительное изучение этого важного вопроса.

Детальные разведочные гидрогеологические исследования на объекте были проведены на трех участках (см. рис. 71), причем на каждом из участков проводилось от 2 до 4 опытных кустовых откачек. Разведочно-эксплуатационные скважины бурились роторным способом с применением обратной промывки и располагались вблизи проектируемых инфильтрационных бассейнов, уровень воды в которых при проведении опытных работ поддерживался постоянным.

В каждом опытном кусте были пробурены 2—3 наблюдательных скважины. Гидрогеологические параметры определялись преимущественно при неустановившемся режиме фильтрации, который отчетливо прослеживался в начальный период откачки. Использованы два приема обработки опытных данных: по графикам прослеживания $S = f(\ln t)$ и методом подбора по понижениям уровня на два момента времени.

В связи с тем, что расход бассейнов при откачках существенно превышал дебит опытной скважины и глубина залегания купола грунтовых вод под бассейном поддерживалась на постоянной отметке, водопроницаемость пород на III разведочном участке определялась по формулам установившейся фильтрации.

Данные определений гидрогеологических параметров горизонта приведены в табл. 20.

Таблица 20

Результаты определения гидрогеологических параметров продуктивного горизонта

№ разведочного участка	Установившееся движение		Неустановившееся движение	
	$km, m^2/сут$		$\alpha, m^2/сут$	$\mu = \frac{km}{\alpha}$
I	1330—1670	1520—1700	$(1,2—1,3) \cdot 10^4$	0,12—0,14
II	2080	1615—1980	$1,4 \cdot 10^4$	0,12
III	1250—2050	1230—2270	$(0,6—2,0) \cdot 10^4$	0,11—0,36

В процессе стационарных режимных исследований и на стадии детальной разведки существенное внимание уделялось вопросу

бактериологической очистки исходной озерной воды на пути фильтрации из бассейнов к водозаборным скважинам.

На основании многочисленных анализов проб воды, отобранных из наблюдательных скважин, было установлено, что полная бактериологическая очистка воды происходит на расстоянии 15 м от бассейнов. Эти данные позволили рассчитать время гибели бактерий *E. Colli* в условиях исследуемых участков. Расчет производился по формуле

$$t_0 = \frac{(L + \Delta L)n}{Ki}, \quad (\text{XIII.6})$$

где t_0 — время полной очистки воды, сут;

L — расстояние от бассейна до скважины, где фиксируется полная очистка, м;

ΔL — сопротивление ложа экспериментального бассейна, м;

i — фиксированный градиент потока, доли единицы;

K — коэффициент фильтрации горизонта.

Согласно расчету, в исследуемых условиях необходимое время для полной бактериологической очистки составило $t = 12,5$ сут, что в 2—4 раза ниже норм, принятых в ГОСТах ряда зарубежных стран (Усенко, 1972). Полученная величина t_0 была положена в основу определения допустимого понижения уровня воды в скважинах при выбранных расстояниях их от бассейна

$$S_d = h_{ст} - \frac{n(L' + \Delta L')^2}{t_0 K}, \quad (\text{XIII.7})$$

где h — статический уровень на линии скважин, м;

L' — выбранное расстояние скважин от бассейна, м;

$\Delta L'$ — сопротивление ложа питающего инфильтрационного бассейна.

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С УЧЕТОМ ИСКУССТВЕННОГО ИХ ВОСПОЛНЕНИЯ

Ввиду сложной конфигурации внешних и внутренних границ было принято решение об оценке эксплуатационных запасов подземных вод методом моделирования.

Анализ гидродинамических условий района разведочных работ показал, что фильтрационный поток в пределах исследуемой области фильтрации можно свести к плановому, а оценку запасов подземных вод провести методами, справедливыми для стационарного режима фильтрации. Исходя из этого, моделирование осуществлялось на бумажных моделях ЭГДА. Методика моделирования изложена в работе Э. А. Грикевича (1976 г.). Общая площадь района, представленного на модели, составляла 90 км².

Величина средней водопроницаемости пласта во всей области фильтрации была принята равной $km = 1500$ м²/сут. Величины водопроницаемости, полученные по модели и определенные по

данным опытных откачек и режимных наблюдений, практически оказались близкими между собой.

Моделирование проводилось в несколько этапов. Вначале выявлялась степень достоверности представления на модели естественных гидрогеологических условий участка (1902 г.). Затем моделировался участок водозабора при его работе до сооружения инфильтрационных бассейнов (1942 г.). Последний этап заключался в моделировании работы водозабора при искусственном восполнении (июль 1967 г.). Выбор указанных периодов для определения репрезентативности модели обуславливался наличием наиболее полных исходных гидрогеологических данных.

Эксплуатационные скважины действующего водозабора ввиду их большого числа (1942 г. — 193 скв., 1967 г. — 236 скв.) группировались в короткие ряды и каждый дискретный ряд в соответствии с методом фильтрационных сопротивлений заменялся траншеей. Общее количество выделенных траншей на изученной площади составляло 19 в 1942 г. и 24 в 1967 г.

Моделирование работы водозабора при искусственном восполнении (1967 г.) производилось следующим образом.

Возможные дебиты выделенных коротких рядов скважин рассчитывались на основании данных расходомерии, выполненной институтом ВОДГЕО в 1970 г. На участках, где данные расходомерии отсутствовали, распределение дебита вдоль длины считалось равномерным. Инфильтрационные бассейны на модели представлялись в виде отрезков фольги в масштабе модели.

Несмотря на ряд допущений, полученные на модели величины пьезометрических уровней оказались весьма близки к наблюдаемым по скважинам (высота напора на участке $h = 20-40$ м). Следовательно, электрическая модель функционально отражала гидродинамические условия участка водозабора и с достаточной степенью достоверности могла быть использована для оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

Оценка общих эксплуатационных запасов подземных вод на площади изучаемого объекта проводилась применительно к четырем разведочным участкам, на основании анализа результатов опытно-фильтрационных работ, режимных наблюдений и опыта работы действующих водозаборов. За начальное состояние исследуемого фильтрационного поля принято состояние, зафиксированное в 1970 г., и относительно него на выбранных участках определялись параметры водоотбора для новых заданных граничных условий.

Задача по оценке эксплуатационных запасов сводилась к установлению производительности линейных рядов скважин на разведочных участках, с учетом их взаимодействия с действующими водозаборами и искусственным восполнением подземных вод системой инфильтрационных бассейнов.

В процессе исследований считалось, что фильтрация из бассейнов происходит при свободном режиме. В соответствии с этим

гидродинамическое несовершенство бассейнов не принималось во внимание. Средние значения основного параметра — скорости инфильтрации — принимались равными 0,84—1,34 м/сут.

Эксплуатационные запасы рассчитывались для нескольких вариантов искусственного их восполнения. Отбор воды из скважин рекомендовалось производить: на I участке погружными насосами, на II и III участках — сифонным способом. При оценке запасов учитывалась также необходимость не снижать дебит старых водозаборов (табл. 21).

Таблица 21

Исходные гидрогеологические данные и конечные результаты моделирования по оценке эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного питания

№ разведочного участка	Число скважин	Расстояние между бассейнами и сифонными линиями, м	Дополнительное сопротивление лотка бассейна, м	Коэффициент фильтрационного сопротивления, м/сут	Водопроницаемость пласта, м ² /сут	Допустимое понижение уровня в скважинах, м	Расстояние между скважинами водозабора, м	Длина сифонных линий, м	Суммарный дебит скважин, тыс. м ³ /сут	Дебиты отдельных скважин, м ³ /сут	Количество инфильтруемой в бассейны воды, тыс. м ³ /сут
I	17	150	40	8,0	1300	7,0	70	1100	27,8	1560—1875	45,1
II	15	150	40	7,5	1640	7,0	58	810	22,4	1895—2100	28,8
III	17	150	30	8,0	1460	5,0	62,5	1000	28,1	1410—1990	—
IV	24	200	40	4,7	1300	7,0	75	1700	49,3	2540—4480	90,5

В результате проведенных разведочных, опытно-фильтрационных работ, многолетних режимных наблюдений и моделирования ГКЗ СССР были утверждены по промышленным категориям эксплуатационные запасы подземных вод по площади I, II и III разведочных участков, которые обосновывались опытом эксплуатации водозабора и моделированием совместного отбора воды из проектируемых скважин и действующих водозаборов с учетом их искусственного восполнения. Эксплуатационные запасы по четвертому разведочному участку по степени разведанности были отнесены к категории C₁. Таким образом, общая сумма оцененных запасов по категории A + B вдвое превышает ранее утвержденные.

В 1975 г. на III разведочном участке была введена в эксплуатацию первая очередь нового водозабора, что позволило увеличить коэффициент использования инфильтруемой воды до 50—55%.

Режимными наблюдениями за опытом эксплуатации подтвердилась достоверность разведанных запасов подземных вод. При вводе в эксплуатацию водозаборов всех трех разведанных участков коэффициент эффективности системы искусственного восполнения повысится до 70%.

ОПЫТ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПОЛНЕНИЯ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЛИТОВСКОЙ ССР

ОБЩИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Для внедрения искусственного восполнения запасов подземных вод в Литовской ССР произведена реконструкция одного из береговых водозаборов. Участок водозабора расположен в хорошо террасированной долине р. Нярис шириной 0,8—2,0 км, в которой отчетливо выражены три террасы, возвышающиеся на 4—13 м над меженным уровнем реки. К верхней части осадочной толщи пород приурочен водоносный горизонт, представленный песчано-гравийными отложениями. Мощность его до эксплуатации изменялась от 5 до 20 м, а коэффициенты фильтрации пород — от 20 до 200 м/сут. Наибольшими их значениями (70—150 м/сут) отличаются центральная и южная части участка, а на северо-востоке они резко уменьшаются до 20—50 м/сут. Здесь в разрезе водовмещающих пород преобладают мелко- и разнозернистые пески с глинистыми прослойками.

В современном русле реки залегают песчано-гравийные отложения, мощность которых у уреза составляет 5,2—8,0 м. Подземные воды на участке гидравлически связаны с поверхностными водами реки. Значения фильтрационных сопротивлений подрусло-вых отложений (ΔL) до ввода водозабора в эксплуатацию не превышали 50—100 м. Такого же порядка значения ΔL получены и по данным эксплуатации, т. е. связь подземных вод с поверхностными сохраняется очень устойчивой.

По химическому составу грунтовые воды аллювиальных отложений являются гидрокарбонатными кальциевыми с общей минерализацией, не превышающей 300—400 мг/л. По качественным показателям они целиком соответствуют требованиям ГОСТ 2874—73, предъявляемым к питьевой воде.

ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПОЛНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Водоотбор на рассматриваемом участке осуществляется с 1929 г. В составе сооружений имеются 84 скважины, расположенные в линейном ряду вдоль реки на расстоянии 150—500 м от нее (рис. 74). Скважины соединены четырьмя линиями сифонного

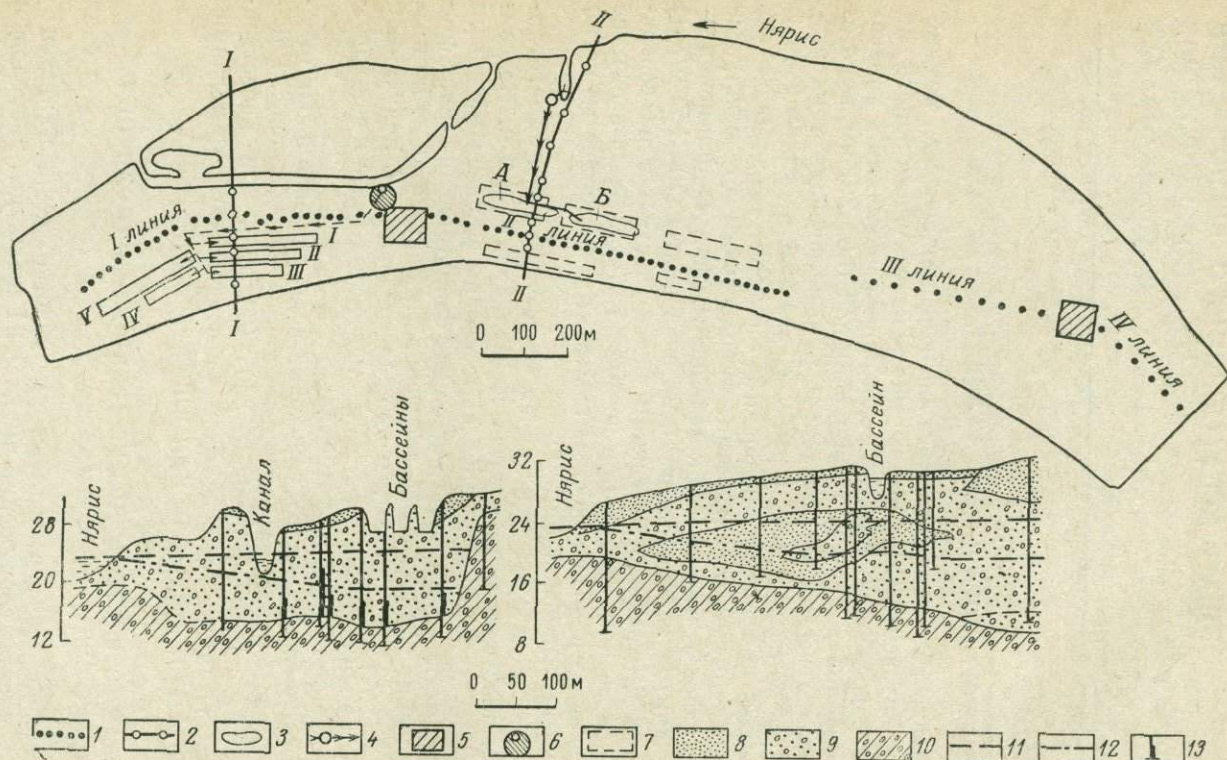


Рис. 74. Схема расположения водозаборных сооружений и гидрогеологические разрезы участка.
 1 — водоносные скважины; 2 — створ наблюдательных скважин; 3 — инфильтрационный бассейн; 4 — подача воды на инфильтрацию; 5 — насосная станция; 6 — станция фильтрации; 7 — проектируемый бассейн; 8 — песок; 9 — гравий; 10 — суглинки; 11, 12 — статический и динамический уровни грунтовых вод. 13 — скважина и положение фильтра

водовода, обслуживаемого двумя насосными станциями в Эйгуляй (I, II) и Клябонишкес (III, IV). Расстояния между скважинами в ряду 25—50 м, их дебиты 250—400 м³/сут. Суммарный расход водозабора в меженные периоды до применения меропрятий по искусственному восполнению не превышал 26—29 тыс. м³/сут.

Имеющееся на водозаборном сооружении насосное оборудование позволяет подавать дополнительное количество воды в 25—30 тыс. м³/сут без существенной технической реконструкции всей системы эксплуатации. Поэтому искусственное восполнение запасов подземных вод здесь представляло особый экономический интерес.

В период проведения разведки и опытных исследований для обоснования проекта строительства инфильтрационных сооружений в районе скважин второй сифонной линии были сооружены два опытных полуинженерного типа бассейна (А, Б) и сеть наблюдательных скважин. Бассейны расположены на расстоянии 50 м от эксплуатационных скважин, имеют неправильную, близкую к трапециевидальной форму: длина по дну 130—140 м, ширина 19—22 м, заложение откосов 1,5, площадь фильтрации при максимальном наполнении 3,5 и 3,2 м соответственно 4250 и 3790 м². Вода на инфильтрацию в бассейны подавалась из реки при помощи насосной станции по трубопроводу (300 мм), уложенному непосредственно на поверхности земли. Подача воды из трубопровода производится в среднюю часть бассейнов на высоте 1,5—1,7 м от их дна. В процессе проведения опытных исследований бассейны действовали 10—11 месяцев в году; наполнялись они в течение 10—20 сут и в дальнейшем работали при постоянном напоре. В остальное время года (обычно весной) бассейны опорожняются и чистятся бульдозером путем снятия верхнего 5—10-сантиметрового слоя заиленных пород.

Учет подаваемой на инфильтрацию воды производится периодически подключением водомера к магистральному водоводу и по отработанному времени насоса, наблюдения за уровнем воды в бассейнах производились по установленным в них геодезическим рейкам. Расход инфильтрации Q_0 определялся непосредственно замером дебита поверхностных вод. Скорость инфильтрации для любого момента времени вычислялась с учетом приведенной ширины бассейна b' :

$$b' = b + 1,34h \sqrt{1 + n^2}; \quad v = \frac{W_n + W_t}{F} \quad v = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (\text{XIV.1})$$

где b — ширина бассейна по дну;

n — заложение откосов;

F — площадь инфильтрации;

W_n и W_t — объемы воды, подаваемой на инфильтрацию и накопившейся в бассейне к расчетному моменту времени;

Δh — величина понижения уровня воды в бассейне за время Δt после прекращения ее подачи.

Изменение расхода инфильтрации характеризовалось графиком отдачи бассейна $Q_0 = f(t)$.

Для определения степени заиленности пород под дном бассейна, фильтрационных свойств илистого осадка и отбора проб воды под этим осадком устанавливались специальные контейнеры, пьезометры и пробоотборники конструкции института ВОДГЕО. После опорожнения инфильтрационных бассейнов перед их чистой в характерных точках определялись коэффициенты фильтрации илистой пленки и закольматированного слоя на глубину до 20—25 см прибором ПВП. До впуска воды и после опорожнения бассейнов по окончании фильтроцикла в характерных местах отбирались пробы пород на различной глубине (до 0,5 м) для определения их гранулометрического состава (рис. 75). В период опорожнения бассейнов, когда фильтрация идет в основном через их дно, осредненный коэффициент фильтрации илистой пленки (K'_0) определялся по формуле Г. Н. Каменского

$$K'_0 = \frac{m'_0}{t} \ln \frac{h_0 + m'_0}{h_t + m'_0}, \quad (\text{XIV.2})$$

где m'_0 — толщина илистой пленки;

h_0 — первоначальный уровень воды в бассейне;

h_t — уровень воды в бассейне по истечении времени t .

На инфильтрацию подавалась речная вода, содержащая в среднем 25—30 г/м³ взвешенных веществ, среднесуточная отдача бассейнов за фильтроцикл изменялась от 12 до 0,7 тыс. м³/сут, а расход водозабора в этот период увеличивался в среднем на 4—5 тыс. м³/сут. Привлекаемая водозабором часть от общего инфильтрационного расхода составляла порядка 0,8.

Инфильтрация из бассейнов протекала без подпора (рис. 76). Подъем уровня подземных вод при опытных исследованиях начинался после истечения суток инфильтрации и продолжался в течение 1,5—2 месяцев. Величина подъема уровня воды под инфильтрационными бассейнами достигала в среднем 0,8—1,5 м. Затем, примерно в продолжение одного-двух месяцев грунтовое водохранилище уравнивалось, т. е. отток в каптаж сравнялся с инфильтрационным потоком, после чего начиналась его сработка. Следовательно, в течение трех месяцев увеличение расхода водозабора обеспечивалось за счет подпора подземных и непосредственно притока инфильтрационных вод, а в последующие четыре-пять месяцев — за счет сработки искусственных запасов. В периоды опорожнения бассейнов инфильтрационный расход практически не отражался на дебите водозабора.

Таким образом, рациональная продолжительность фильтроцикла при использовании поверхностной воды естественной мутности (в среднем 25—30 мг/л) составляет три-пять месяцев. Поэтому для установки оптимального режима искусственного восполнения необходимо осуществлять чистку бассейнов 3 раза в год,

что в климатических условиях Литвы затруднительно. В связи с этим для более рационального расширения водозабора за счет искусственного пополнения подземных вод потребовалось предварительное осветление речной воды перед ее подачей на инфильтрацию с целью уменьшения ее мутности.

Рис. 75. Графики изменения скорости инфильтрации:

1 — фактический; 2 — расчетный при мутности воды 30 мг/л; 3 — то же при мутности воды 10 мг/л

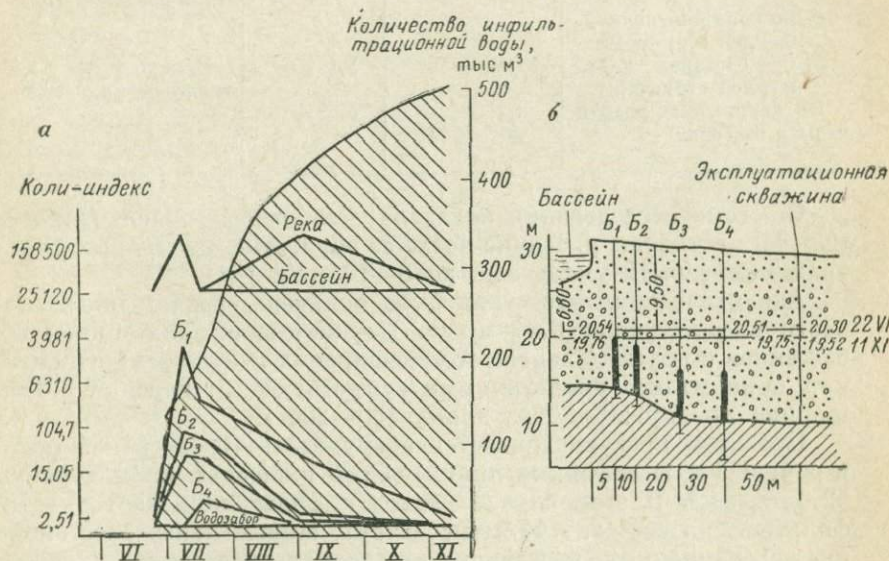
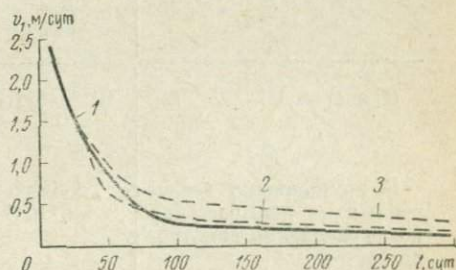


Рис. 76. График изменения бактериального состояния инфильтрационных вод (а) и разрез по створу наблюдательных скважин (б) Б₁, Б₂, Б₃, Б₄.

Во время опытных работ фактически замеренные скорости инфильтрации в течение фильтрацикла в бассейнах изменялись от 2,2 до 0,1 м/сут при средних значениях за это время 0,34—0,40 м/сут. Кольматация пород в бассейнах прослеживалась на глубину 0,2—0,4 м.

Коэффициенты фильтрации илстой пленки, определенные различными способами, отличаются в 2—7 раз (табл. 22). Наиболее достоверными следует принимать значения, полученные в натуральных условиях по сработке уровня воды в бассейнах.

Коэффициенты фильтрации илстой пленки на опытных бассейнах

Метод определения	Коэффициент фильтрации, м/сут		Примечание
	пределы	среднеарифметическое	
Прибором ПВП	10^{-3} — $8 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	Использовалась вода р. Нярис, применяемая при искусственном восполнении Использовалась водопроводная вода
В контейнерах, извлеченных со дна бассейна после окончания фильтроцикла	$1,9 \cdot 10^{-3}$ — $5,9 \cdot 10^{-3}$		
На стабилometре:	$1,6 \cdot 10^{-3}$ — $8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	Использовалась дистиллированная вода
а) по образцам ненарушенной структуры			Использовалась дистиллированная вода
б) по образцам нарушенной структуры	10^{-4} — $6 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	
По понижению уровня воды в бассейне	$3 \cdot 10^{-4}$ — $8,2 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	

Опытные исследования показали, что среднегодовая мутность (25—30 мг/л) воды р. Нярис после ее обработки на скорых фильтрах может быть уменьшена до 8—10 мг/л.

Аналитическими расчетами была получена среднегодовая скорость инфильтрации 0,84 м/сут. Параметры инфильтрационных бассейнов с целью дальнейшего расширения искусственного питания принимались аналогичными существующим: глубина 3,0 м, ширина по дну 20—30 м, длина 150—200 м.

Проектом предусматривается оборудовать 10 бассейнов (по 5 в районе I и II сифонных линий) общей площадью инфильтрации 52,6 тыс. м². В этом случае расход инфильтрации за годичный фильтроцикл составит 44,2 тыс. м³/сут. Минимальное расстояние инфильтрационных бассейнов от эксплуатационных скважин (30 м) принято на основании исследований по изменению физико-химических и бактериологических показателей воды в процессе фильтрации.

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КАЧЕСТВА ИСХОДНОЙ ВОДЫ

Для изучения возможного изменения качества исходной воды на пути фильтрации из бассейнов к эксплуатационным скважинам у бассейна Б были оборудованы четыре наблюдательные скважины, из которых периодически в процессе инфильтрации отбирались пробы воды на химические и бактериологические исследования. Перед отбором проб скважины поочередно прокачивались

Основные физико-химические показатели речной (исходной)
воды и подземных вод из водозаборных скважин

Показатели	Речная вода	Водозаборная
Цветность, градусы	10—45	5—8
Температура, °С	2—23	7—9
Прозрачность, см	3—25	30—35
Мутность, мг/л	3,5—56,0	7,0—7,5
Общая жесткость, мг-экв/л	7,8—8,2	7,0—7,5
Щелочность, мг-экв/л	2,5—4,0	4,0—5,0
Компоненты, мг/л	3,0—4,0	3,0—3,5
Сульфаты	15,0—20,0	30,0—50,0
Хлориды	8,0—10,0	12,0—25,0
Кальций	40,0—50,0	60,0—76,0
Магний	10,0—15,0	10,0—15,0
Аммиак солевой	0,03—0,10	0—0,02
Нитриты	0,0—0,02	0
Нитраты	0,2—0,6	0,2—0,4
Фосфаты	0,02—0,04	0,003—0,025
Железо общее	0,0—0,5	0,2—0,5
Окисляемость, мг/л O ₂	5,0—8,0	2,0—5,0
Общая минерализация, мг/л	170,0—210,0	250,0—320,0

эрлифтом в течение 1—1,5 ч. Одновременно отбирались пробы непосредственно из реки, бассейнов и водозаборного колодца. Эксплуатация водозабора показала, что при опытных масштабах искусственного восполнения качество подземных вод изменяется незначительно (табл. 23).

Исследования бактериологического состояния поверхностной воды показали следующие результаты. До начала инфильтрации подземная вода на водозаборном участке в бактериологическом отношении является совершенно чистой.

Проведенные исследования самоочищения поверхностной исходной воды при ее фильтрации в породах зоны аэрации и продуктивного горизонта водозаборного участка показали, что полное бактериологическое ее улучшение достигается на расстоянии 20—30 м от источника питания. При этом ухудшение бактериологического состояния воды наблюдается только в первые 2,5 месяца инфильтрации. Тем не менее увеличение инфильтрационного расхода может повлечь за собой ухудшение качества смешанной воды, поэтому при эксплуатации в начале инфильтрации необходимо предусмотреть ее обеззараживание на выходе к потребителю.

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С УЧЕТОМ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПОЛНЕНИЯ

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод выполнена методом математического моделирования для существующей системы каптажа и с учетом принятой схемы и средней скорости

инфильтрации. Гидрогеологические условия участка водозабора показывают, что фильтрационный поток может быть сведен к плановому, а оценка эксплуатационных запасов произведена методами, справедливыми для стационарной фильтрации. Поэтому моделирование осуществлялось на бумажных моделях ЭГДА по общепринятой методике.

Охваченная моделированием область фильтрации практически совпадает с площадью развития аллювиального водоносного горизонта на водозаборном участке. Исходная схема была составлена при отсутствии искусственного восполнения (бассейны очистились) и наиболее низком горизонте воды в реке, что обусловило минимальные расходы водозабора 27,8 тыс. м³/сут и уровни подземных вод. Распределение фильтрационных характеристик водоносного горизонта по площади оценивалось по гидродинамической сетке. Коэффициенты водопродовимости km рассчитывались для каждой ячейки в отдельности по формуле Дарси

$$Q = km \frac{\Delta S}{\Delta L} \Delta h, \quad (\text{XIV.3})$$

где Q — расход грунтового потока, протекающего через сечение, ограниченное соседними линиями тока и гидроизо-гипсами;

m — мощность водоносного горизонта при эксплуатации подземных вод;

ΔL — длина линии тока между соседними гидроизогидами;

ΔS — разность уровней воды в пределах ячейки;

Δh — длина гидроизогида между двумя смежными линиями тока.

Пересчет коэффициентов водопродовимости в удельные сопротивления электропроводной бумаги выполнен по формуле

$$R_i = \frac{R_n km_n}{km_i}, \quad (\text{XIV.4})$$

где R_i — удельное сопротивление вычисляемой зоны;

m_n и R_n — коэффициент водопродовимости и удельное сопротивление произвольно выбранной зоны.

По урезу воды в реке и отдельным гидроизогидам, примыкающим к борту долины, задано условие первого рода, что обеспечило неизменность естественного потока при последующем моделировании искусственной инфильтрации. Эксплуатационные скважины, объединенные в отдельные сифонные линии, на модели заменены эквивалентными галереями, на которых также задано условие первого рода. На участках резкого уменьшения мощности водоносного горизонта модель обрезалась. Пересчеты уровня воды в электрические потенциалы выполнялись по формуле

$$U = \frac{h^2 - h_{\min}^2}{h_{\max}^2 - h_{\min}^2} 100\%, \quad (\text{XIV.5})$$

где U — электрический потенциал, соответствующий уровню грунтовых вод;

h — уровень грунтовых вод в данной точке;

h_{\min} — минимальный уровень, соответствующий 0;

h_{\max} — максимальный уровень, соответствующий горизонтальной плоскости, проведенной по отметке 13 м абс. высоты.

Составленная таким образом модель области фильтрации (масштаб 1 : 2000) проверялась путем решения обратной задачи с учетом фактических данных замера уровня воды и расхода водозабора на дату составления модели. Погрешность при этом не превышала 5—7%.

При моделировании учитывалось проектное размещение на участках 10 бассейнов общей площадью инфильтрации по дну 52,6 тыс. м². На модели бассейны реализованы в виде специально изготовленных медных прижимных электродов, их размеры соответствовали масштабу модели. Результаты моделирования по определению эффективности искусственного восполнения запасов подземных вод приведены в табл. 24.

Таблица 24

Результаты оценки эксплуатационных запасов подземных вод путем их искусственного воспроизводства

№ бассейнов	Расход на инфильтрационный бассейн, м ³ /сут	Расход Эйгулйского водозабора с учетом искусственной инфильтрации, м ³ /сут	Увеличение расхода за счет искусственного восполнения		Доля воды, забираемой каптажными сооружениями при искусственном питании
			м ³ /сут	%	
I	4200	18 430	2830	18,1	0,67
II	3360	17 690	2090	13,4	0,62
III	3780	17 960	2360	15,2	0,53
IV	2100	17 470	1240	12,0	0,59
V	6300	19 980	4380	28,0	0,69
VI	7620	20 350	4750	30,5	0,71
VII	6720	21 000	5400	36,5	0,82
VIII	5540	20 140	4540	29,1	0,80
IX	4200	19 380	3780	20,2	0,90
X	1260	16 700	1100	7,0	0,87

Количество инфильтрующейся воды, которое забирается эксплуатационными скважинами в течение годового цикла работы бассейнов, составляет 32,5 тыс. м³/сут. Суммарные эксплуатационные запасы подземных вод водозаборного участка с учетом естественного и искусственного питания составляют 48,1 тыс. м³/сут.

Следовательно, расход водозабора от искусственного восполнения увеличивается более чем в три раза. Уровни подземных вод при этом в районе водозабора повышаются на 0,5—2,2 м от

первоначальных, принятых для моделирования, т. е. в грунтовой емкости сохраняется резервный объем воды.

Данные режимных наблюдений годовой эксплуатации опытной установки подтвердили результаты прогнозных гидрогеологических расчетов. При постоянной работе первой очереди трех-четырех бассейнов и подачи на инфильтрацию предварительно осветленной воды с мутностью 6—12 мг/л производительность водозабора увеличилась на 13—14 тыс. м³/сут, а уровни подземных вод в районе бассейнов повысились на 2,0—3,5 м.

Себестоимость добычи воды на водозаборе после пуска в эксплуатацию первой очереди установки искусственного восполнения запасов подземных вод уменьшилась на 0,15 коп/м³ (расчетное для всего комплекса 0,28 коп/м³). Годовой экономический эффект при этом составляет около 60 тыс. руб.

ГИДРОГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОСПОЛНЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Экономическая оценка гидрогеологических изысканий при искусственном восполнении подземных вод определяется стоимостью и надежностью обоснования эксплуатационных запасов, а также сравнительной стоимостью воды при возможных вариантах использования подземных вод с учетом потребного качества их.

Эксплуатационные экономические показатели нередко (с учетом качества воды) являются даже более важными, чем показатели стоимости гидрогеологических изысканий. Так как экономика изысканий освещена во многих работах, здесь остановимся на экономическом анализе эксплуатации.

Экономический анализ следует делать в основном по «Типовой методике определения экономической эффективности капитальных вложений» (1969). Сравнительный экономический анализ различных вариантов схем использования источников подземных вод в соответствии с отмеченной типовой методикой делается с учетом расширенного воспроизводства, но в анализе мы приводим также показатели и по простому воспроизводству (текущие затраты — себестоимость).

В качестве основного экономического показателя для сравнения различных вариантов принимаются приведенные затраты по формулам

$$C_1 + E_n K_i = \min, \quad (XV.1)$$

$$T_n C_1 + K_i = \min, \quad (XV.2)$$

где C_1 — текущие затраты (себестоимость) по каждому варианту;

K_i — 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 «Типовой методикой...» (1969) 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 рекомендуемых величин нормативных коэффициентов и срока окупаемости капитальных вложений.

При сравнении вариантов приведенные затраты определяются 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 (XV.1) и (XV.2) относить к 1 м^3 воды, разделив на расход воды в течение года. Тогда мы получим удельные приведенные затраты по каждому варианту, отнесенные к 1 м^3 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 путем приведения затрат поздних лет к текущему моменту с введением коэффициента приведения B по формуле

$$B = \frac{1}{(1 + E_{н. п})^t}, \quad (\text{XV.3})$$

где t — период времени приведения, годы;

$E_{н. п}$ — норматив для приведения разновременных затрат, равный 0,08 (в условиях действующего порядка начисления амортизации).

При определении сравнительной экономической эффективности капитальных вложений при реконструкции действующих предприятий производится сравнение показателей по вариантам реконструкции с показателями предприятий до реконструкции и в соответствующих случаях с вариантами нового строительства. При этом учитываются 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

$$T_{к. с.} = \frac{K_p}{C_1 - C_2}, \quad (\text{XV.4})$$

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 (XV.1) и (XV.2) следует делать также с учетом изменения общей производительности реконструируемого

сооружения, а сравнение экономической эффективности производить по удельным показателям, отнесенным к расходу 1 м^3 воды. Такое замечание, в частности, относится к реконструкции берегового инфильтрационного водозабора, когда нужно увеличивать его производительность при увеличении потребности, а также в связи с заиливанием русла реки (последнее уменьшало производительность берегового инфильтрационного водозабора); при реконструкции имеется в виду дополнительное искусственное подпитывание подземных вод. В результате сооружения искусственного восполнения подземных вод производительность существующего водозабора увеличивается, а стоимость воды обычно уменьшается. Эффективность искусственного восполнения в данном случае по существу определяется не только экономическими показателями по формуле (XV.4), но и тем, что при увеличении производительности водозабора подземных вод будут увеличиваться водопотребление и улучшаться гигиенические условия. Последнее также дает экономическую эффективность, но в формуле (XV.4) это не учитывается.

При рассмотрении реконструкции берегового водозабора с устройством дополнительного искусственного восполнения подземных вод нередко динамический уровень воды в водозаборе повышается. При этом снижается поступление инфильтрационной воды со стороны реки, но с учетом дополнительного поступления искусственной инфильтрации воды общий расход прежнего водозабора существенно увеличивается и, как отмечено, вода нередко становится даже дешевле.

В работах В. М. Берданова (1973), Н. А. Плотникова и К. И. Сычева (1976) приводятся сведения по технико-экономическим показателям искусственного восполнения подземных вод (скважины глубиной по 30 м и производительностью по $1700 \text{ м}^3/\text{сут}$ каждая) при разной водоподготовке и сравнение их с данными при использовании поверхностных вод для водоснабжения с полной очисткой при производительности 50 и 100 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ во всех случаях. Из этих сведений следует, что варианты с искусственным восполнением подземных вод по удельным приведенным затратам в 1,48—1,05 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, фильтрацию и аэрацию, удельные 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 производительности рассмотренных вариантов с 50 до 100 тыс. м³/сут удельная себестоимость уменьшается на 9—21% и приведенные затраты — на 1—5%. При изменении принятых выше условий показатели экономического анализа вариантов, конечно, могут изменяться.

Следует учитывать, что при искусственном восполнении подземных вод качество их получается обычно лучше, чем при полной очистке поверхностных вод. В частности, вода, получаемая при искусственном восполнении, имеет значительно меньшие амплитуды температуры: летом она 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 создания емкостных запасов подземных вод при недостатке расхода реки в межень является весьма важным показателем, определяющим выгодность и рациональность искусственного восполнения подземных вод.

При производительности водопроводов меньше 50 тыс. м³/сут соотношение себестоимости воды при искусственном восполнении подземных вод по сравнению с полной очисткой речных вод будет еще более выгодным. Следует отметить, что для малых водопроводов 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 водопроводов РСФСР (без Москвы и Ленинграда) была в среднем для водопроводов с очисткой воды (в основном из рек) 3,37—5,62 коп. (средневзвешенная стоимость 3,75 коп. за 1 м³ воды) и для водопроводов без очистки (из подземных вод) — 3,9 коп. В Риге, по последним данным, себестоимость воды при искусственном восполнении с инфильтрационными бассейнами и аэрацией составляла около 1,87 коп. за 1 м³. При этом коэффициент полезного действия α_n (отношение расхода воды, получаемого за счет искусственного восполнения подземных вод, к расходу, подаваемому на инфильтрационные бассейны) был около 0,45—0,5, т. е. довольно низкий. После дополнительной реконструкции этой системы искусственного восполнения коэффициент полезного действия увеличился примерно до 0,90—0,95, 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 α_n получилась 104 тыс. руб. (В табл. 1 стоимость 1 м³ воды при ис-

куственном восполнении по приведенным затратам изменяется от 1,26 до 1,90 коп.

Г. В. Богомоловым, А. Х. Альтшулем, В. С. Усенко и другими (1976 г.) приводится экономическое сравнение трех вариантов водозаборов подземных вод для объекта в долине р. Днепра: I вариант — из палеоген-неогенового водоносного горизонта со скважинами глубиной 70—100 м; II вариант — береговой инфильтрационный водозабор из аллювиального водоносного горизонта со скважинами глубиной 20—25 м и III вариант — комбинация берегового инфильтрационного водозабора с частичным искусственным восполнением подземных вод и с водозабором из скважин глубиной по 20—25 м. Себестоимость 1 м³ воды по I варианту составляет 2,7 коп., по II варианту — 4,3 коп. и по III варианту — 1,7 коп., т. е. при искусственном восполнении вода стоит дешевле. В 1973 г. по расчетам А. Х. Альтшуля и В. С. Усенко себестоимость 1 м³ была дешевле в 1,5—2 раза.

А. Х. Альтшуль (1971) приводит пример берегового инфильтрационного водозабора с удельными капиталовложениями на 1 м³ воды (исходя из годового расхода) 13 коп. и себестоимостью 1 м³ воды — 2,8 коп. В проекте при увеличении в 4 раза водотока для этого же объекта с искусственным восполнением подземных вод удельные капиталовложения составят 6,5 коп. на 1 м³ воды и себестоимость 1 м³ воды 1,6 коп. При таких условиях эффективность искусственного восполнения ясна.

По данным экономических расчетов искусственное восполнение подземных вод даже в суровых условиях Северо-Востока Азии (СССР) оказывается конкурентоспособным.

Особенно целесообразно и эффективно искусственное восполнение для увеличения производительности существующих береговых инфильтрационных водозаборов; при этом преимущества искусственного восполнения дополнительно определяются увеличением потребности в воде при сравнении с вариантом развития береговых инфильтрационных водозаборов при удалении их от потребителя.

Стоимость подземной воды при искусственном восполнении за рубежом приведена в табл. 25.

Для зарубежных стран капиталовложения при искусственном восполнении с бассейнами и каналами на 1 м³ воды составляют без предварительной водоподготовки в среднем 0,14 франка (от 0,025 до 0,190) 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.

Стоимость 1 м³ воды при искусственном восполнении

Объект	Год	Производительность, млн. м ³ /год	Стоимость 1 м ³ воды, франки	Примечание
Дортмунд (Рур, ФРГ)	1967	100	0,14—0,19	Инфильтрационные бассейны
Круасси—Сюр-Сев (Франция)	1967	10	0,29	Инфильтрационные бассейны, сложная водоподготовка
Базель (Швейцария)	1967	49	0,12	
Калифорния (США, четыре участка)	1965	300	1,6—2,48	
Аламитос (США)	—	—	0,10—0,32	Для борьбы с интрузией соленых вод

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 указанной «Типовой методике определения экономической эффективности капитальных вложений» (1969).

В качестве вариантов можно принимать другие участки искусственного восполнения, участки с эксплуатацией подземных вод без искусственного восполнения, а также использовать поверхностные воды с соответствующей полной очисткой.

Изыскания следует вести с анализом экономики эксплуатации различных вариантов.

Алексеев В. С., Боголюбов К. С., Никольская Е. А. Отечественный и зарубежный опыт искусственного пополнения запасов подземных вод. — В кн.: *Итоги науки и техники, серия «Гидрогеология и инженерная геология»*. Т. 3, М., 1964, с. 5—148 (ВИНИТИ).

Альтшуль А. Х. Искусственное регулирование запасов подземных вод в условиях Белоруссии. Минск, АН БССР, 1971. 24 с. (автореферат диссертации).

Альтшуль А. Х., Усенко В. С. Эффективность и перспективы искусственного пополнения запасов подземных вод в Белоруссии. — В кн.: *Мат-лы Межреспубликанского семинара прибалтийских геол. организ. по искусственному пополнению подземных вод*. Вильнюс, 1973, с. 62—75.

Бабушкин В. Д., Глазунов И. С., Гольдберг В. М. Основные принципы эксплуатации и оценки запасов крупных линз пресных вод. Госгеолтехиздат, 1962. 102 с.

Берданов В. М. Подготовка воды при искусственном пополнении подземных вод для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения. — В кн.: *Докл. научн.-техн. конф. по обмену опытом в области искусственного пополнения подземных вод*. М., 1971, с. 53—62.

Богомазов П. Е. Исследование процесса очистки речной воды при фильтрации в песках. — *«Водоснабжение и санитарная техника»*. 1972, № 9, с. 1—4.

Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М., «Недра», 1973. 303 с.

Бочевер Ф. М., Орадовская А. Е. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнений. М., «Недра», 1972. 129 с.

Бочевер Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1968. 325 с.

Основы гидрогеологических расчетов. М., «Недра», 1969. 366 с. Авт.: Ф. М. Бочевер, И. В. Гармонов, А. В. Лебедев, В. М. Шестаков.

Бурчак Т. В. Определение отдачи инфильтрационных бассейнов. Киев, 1970. 80 с. (Укр. НИИНТИ).

Венкис А. Э. Определение действительной скорости фильтрации на примере инфильтрационного водозабора Балтээзерс. Вып. II, Рига, 1971, с. 64—68.

Веригин Н. Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М., Госстройиздат, 1962. 235 с.

Веригин Н. Н. Миграция растворенных и эмульгированных веществ при сбросах промышленных стоков в водоносные пласты. — «Тр. ВНИИ ВОДГЕО, вып. 22», 1969, с. 27—39.

Вода питьевая. ГОСТ 2874—74. М., Изд-во стандартов, 1973. 8 с.

Временные указания по эксплуатации систем искусственного пополнения запасов подземных вод с инфильтрационными бассейнами. М., 1972. 14 с. (АКХ РСФСР).

Выживаемость и миграция микроорганизмов в подземных водах при искусственном пополнении их запасов. — В кн.: Актуальные вопросы санитарной микробиологии. М., 1973. 77 с. Авт.: А. Т. Николаева, Е. И. Моложавая, Е. Н. Корнев, М. И. Афанасьева.

Гасс П. М. Опытные работы по выявлению искусственного питания эксплуатируемого водоносного горизонта. — В кн.: Гидрогеологическое обоснование искусственного пополнения запасов подземных вод. Мат-лы научн.-техн. сов. Ч. 1. М., 1973, с. 81—83 (ВСЕГИНГЕО).

Гидрогеологические исследования с целью создания искусственных пресных линз в северной части Крыма. — В кн.: Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Украины. Инженерно-геологические и гидрогеологические прогнозы. Киев. «Будивельник», 1974, с. 58—60. Авт.: А. В. Луцкий, В. И. Морозов, А. А. Конджаспиров, А. А. Басс, Т. В. Щегликов.

Глазунов И. С., Роговская Н. В. Методы гидрогеологических исследований и расчетов для обоснования магазинирования пресных вод. М., 1968, с. 137 (ВСЕГИНГЕО).

Гольдберг В. М. Гидрогеологические прогнозы движения загрязненных подземных вод. «Недра», 1976. 169 с.

Григорьев В. М. Расчет подрусловых инфильтрационных водозаборов. — «Тр. ВНИИ ВОДГЕО, вып. 13». 1966, с. 66—83.

Григорьев В. М. Зарубежный опыт искусственного пополнения запасов подземных вод. — «Тр. ВНИИ. Водоснабжение, канализация гидрогеологических сооружений и инж. гидрогеологии, вып. 9». 1964, с. 3—50.

Дилюнас И. П. Перспективы использования подземных вод речных долин Нямунас и Нерис. Вильнюс, «Минтис», 1973. 118 с.

Жужиков В. А. Фильтрация. М., «Химия», 1971. 440 с.

Заягинцев Д. Г. Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями. М., Изд-во МГУ, 1973. 175 с.

Изучение сорбционной способности водонасыщенных грунтов при фильтрации воды, загрязненной 3—4-бензпиреном и нефтепродуктами. — В кн.: Гидрогеологическое обоснование искусственного пополнения запасов подземных вод. Ч. II. М., 1973, с. 253—257. Авт.: Е. И. Моложавая, Л. А. Ветрило, К. П. Ершова, Г. Н. Пецух.

Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1962. 86 с.

Искусственное пополнение запасов подземных вод. М., об-во «Знание», РСФСР, 1976. 192 с.

Клячко В. А., Апельцин И. Э. Очистка природных вод. М., «Стройиздат», 1971. 579 с.

Ковалевский В. С. Методическое руководство по изучению режима подземных вод в районах водозаборов. М., 1968. 197 с. (ВСЕГИНГЕО).

Коноплянец А. А. Применение методов математической статистики для анализа и прогноза режима уровня подземных вод (Методические указания). М., 1967. 107 с. (ВСЕГИНГЕО).

Красильщиков Д. Г. К вопросу предупреждения опасности загрязнения хлороорганическими пестицидами подземных вод в процессе искусственного пополнения запасов поверхностными водами. — В кн.: Гидрогеологическое обоснование искусственного пополнения запасов подземных вод. Ч. II. М., 1973, с. 259—265.

Краткое руководство по проектированию инфильтрационных сооружений для искусственного пополнения подземных вод с целью хозяйственно-питьевого водоснабжения. М., 1972. 34 с. (АКХ РСФСР).

Крицюнас В. К. Гидрогеологические аспекты применения искусственного восполнения запасов подземных вод методами напорной инфильтрации в Литовской ССР. — В кн.: Мат-лы Межреспубликанского семинара прибалтийских геол. организ. по искусственному пополнению подземных вод. Вильнюс, 1973, с. 37—47.

Кунин В. Н., Лецинский Г. Т. Опыт искусственного формирования линз пресных подземных вод в пустыне. — «Проблемы освоения пустынь», 1970, № 3, с. 12—19.

Лукнер Л., Шестаков В. М. Моделирование геофильтрации. «Недра», 1976. 407 с.

Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967. 600 с.

Манукьян Д. А., Рошаль А. А. Определение параметров миграции для прогноза изменения качества подземных вод при водоотборе. — «Разведка и охрана недр», 1973, № 11, с. 41—47.

Минкин Е. Л. Гидрогеологические расчеты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод. М., «Недра», 1967. 137 с.

Минкин Е. Л., Сычев К. И. К прогнозу работы инфильтрационных бассейнов. — «Водные ресурсы», 1972, № 2, с. 125—130.

Милиц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды. М., Стройиздат, 1964, 156 с.

Милиц Д. М., Шевелев Ф. А. Водоснабжение в Нидерландах. — «Водоснабжение и санитарная техника», 1962, № 9, с. 34—35.

Опыт и методы искусственного пополнения запасов подземных вод. М., ОНТИ ВИЭМС, 1966. 135 с. Авт.: Ю. И. Рябчук, И. Н. Егорова, И. С. Глазунов.

Орадовская А. Е., Бочевер Ф. М. Некоторые закономерности дисперсии и сорбции на грунтах при фильтрации загрязненных подземных вод. — В кн.: Гидрогеологические вопросы подземного захоронения промышленных стоков. М., 1969, с. 146—159 (ВСЕГИНГЕО).

Перлина А. М., Берданов В. М. Изменение качества воды при ее инфильтрации. — «Водоснабжение и санитарная техника», 1971, № 8, с. 1—4.

Плотников Н. А., Сычев К. И. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением. М., «Недра», 1976. 152 с.

Плотников Н. А. Методы увеличения эксплуатационных ресурсов подземных вод. — В кн.: Проблемы комплексного изучения засушливых зон СССР. М., 1973, с. 110—112.

Плотников Н. А. Принципы оценки эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном их восполнении. — В кн.: Гидрогеологическое обоснование искусственного пополнения запасов подземных вод. Ч. II. М., 1973, с. 125—135.

Плотников Н. И. Основные направления и содержание гидрогеологических работ для обоснования искусственного восполнения запасов подземных вод. — В кн.: Гидрогеологическое обоснование искусственного пополнения запасов подземных вод. Мат-лы научн.-техн. сов. Вильнюс, 1973, с. 4—17 (ВСЕГИНГЕО).

Плотников Н. И. К вопросу об искусственном восполнении эксплуатационных запасов подземных вод на действующих водозаборах. — В кн.: Вопросы оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Ротопринт. Вып. 45. М., 1971, с. 4—30 (ВСЕГИНГЕО).

Плотников Н. И. Эксплуатационная разведка подземных вод. М., «Недра», 1973. 296 с.

Плотников Н. И. Поиски, разведка и оценка эксплуатационных запасов подземных вод для целей крупного водоснабжения. Изд. МГУ. Часть I, 1963. 236 с.; часть II, 1965. 468 с.

Поиски, разведка, оценка запасов и эксплуатация линз пресных вод. М., «Недра», 1969. 301 с. Авт.: В. Д. Бабушкин, И. С. Глазунов, В. М. Гольдберг и др.

Порядин А. Ф. Искусственное пополнение подземных вод и возможности применения его на инфильтрационных водозаборах в Сибири. — В кн.: Докл. научн.-техн. конф. по обмену опытом в области искусственного пополнения подземных вод. М., 1971, с. 25—38 (АКХ РСФСР).

Резервы водоснабжения белорусских нефтяных месторождений и эффективность их использования. Минск, «Наука и техника», 1975. 15 с. Авт.: Г. В. Богомолов, Усенко В. С., Альтшуль А. Х. и др.

Сергеев Е. М., Куприна Г. А. Исследование колматации песков на опытных котлованах. — «Тр. совещ. по теоретическим основам технич. мелиорации грунтов». М., 1961, с. 388—396.

Спрогис Я. Я. Проектирование и эксплуатация инфильтрационных бассейнов Рижского водопровода. — «Водоснабжение и санитарная техника», 1968, № 6, с. 17—21.

Сычев К. И. Гидрогеологическое обоснование искусственного пополнения запасов подземных вод. М., 1975. 100 с. (ВСЕГИНГЕО).

Сычев К. И. Основные принципы гидрогеологического обоснования искусственного пополнения подземных вод. — «Геология и разведка». 1975, № 8, с. 92—97.

Сычев К. И. Особенности гидрогеологических и гидрологических исследований при искусственном пополнении подземных вод. — В кн.: Сб. докл. научн.-техн. семинара «Искусственное пополнение запасов подземных вод». М., 1976, с. 82—89 (Московский дом научн.-техн. пропаганды).

Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений. М., «Экономика», 1969. 14 с.

Усенко В. С. Искусственное восполнение запасов и инфильтрационные водозаборы подземных вод. Минск, «Наука и техника», 1972. 252 с.

Усенко В. С. Фильтрационные расчеты искусственного восполнения запасов подземных вод. — В кн.: Проблемы использования водных ресурсов. Минск, 1971, с. 72—99.

Фаворин Н. Н. Искусственное пополнение подземных вод. М., «Наука», 1967. 199 с.

Фролов Н. И. Температурный режим гелиотермозоны. М., «Недра», 1966. 154 с.

Шестаков В. М. Динамика подземных вод. Изд. МГУ, 1973. 326 с.

Шин Г. А. Формирование режима грунтовых вод полей орошения. (Автореф. диссертации). М., 1970, 31 с. (ВСЕГИНГЕО).

Экспериментальные и натурные исследования по гигиенической оценке метода искусственного пополнения запасов подземных вод. — В кн.: Мат-лы объединенной конференции гигиенистов, организаторов здравоохранения, эпидемиологов. Кишинев, 1973, с. 61—62. Авт.: А. Т. Николаева, Е. И. Моложавая, Л. А. Лакримэ, М. И. Афанасьева.

Bize J., Bourquet L., Lemoine J. L'alimentation artificielle des nappes souterraines. Masson et Cie Editeurs 120, Boulevard Saint-Germain, Paris. Imprimé en France, 1972. 218 p.

Casati A. und Merkofer E. Grundwasseranreicherung in der Muttenzer Hard (bei Basel) GWF, Bd. 106, 1965. 142 S.

Haberer K. Chemische Probleme bei der Wassergewinnung durch Uferfiltration und künstliche Grundwasseranreicherung. — «Österreichische Wasserwirtschaft», 1973. Heft 5/6, S. 318—331.

Hálek V., Jedlička B., Kněžek M., Zajíček V. Artificial recharge in Czechoslovakia. Supporting paper E. Praha, 1970.

Johnson A. J., Sniegocki R. T. Comparison of laboratory and field analyses of aquifer and well characteristics at an artificial recharge well site. — «Haifa», 1967, p. 182—193.

Löffler H., Pietsch W., Huhn W. Erhöhung der Grundwasseranreicherung — weitere Ergebnisse zu Einsatz, Technologie und Bemessung. — «Wasserwirtschaft — Wassertechnik», 1973. S. 260—273.

Schmidt Kn. Die Abbauleistungen der Bakterienflora bei der Langsam-sandfiltration und ihre Beeinflussung durch die Rohwasserqualität und andere Umwelteinflüsse. Biologische Studien zur künstlichen Grundwasseranreicherung. — Veröff. d. Hydrol. Forsch. Abt. d. Dortmunder Stadtwerke, Aq. 1963, № 5, S. 365—381.

Trueb E. Theorie und Praxis der Grundwasseranreicherung in der Schweiz. — «Österreichische Wasserwirtschaft». 1973. Heft 5/6, S. 277—290.

- Аридная зона 64
 Аэрация 83, 85, 93
 Анизотропия 212

 Безнапорный режим 19
 Балансовый метод 210
 Бактериальные показатели 69

 Водозаборный участок 35, 44, 165
 Водозаборное сооружение 18, 120, 133, 261
 Водоносный горизонт 67
 Водозабор 11, 12, 66, 97, 211, 257, 355, 426, 430
 Вода питьевая 69
 Водозаборные скважины 67

 Гидрогеосфера 3, 37
 Гидробиологический анализ 71
 Гранулометрический состав 81
 Гидрогеологические параметры 155, 158, 277
 Групповой водозабор 26
 Гряземкость пород 159, 170
 Гидравлический метод 203

 Действующий водозабор 19, 31, 107, 210
 Депрессионная воронка 62
 Детальная разведка 206, 208

 Естественные ресурсы 14, 238

 Заиление 8, 16, 168, 172
 Зона аэрации 85

 Инфильтрационный бассейн 29, 67, 82, 165
 Искусственное восполнение 7, 66, 67, 91

 Инфильтрационный водозабор 10, 46, 216
 Инфильтрационное сооружение 16, 66, 222
 Искусственные ресурсы 14
 Ионный обмен 72
 Инфильтрационные скважины 68
 Искусственное питание 242

 Кольматация 8, 16, 46, 172
 Коэффициент фильтрации 86, 158
 — водопроницаемости 158
 — водоотдачи 158
 Коагуляция 72

 Литологический состав 19, 113
 Линзы пресных вод 252

 Магазинирование 14, 127
 Микрофильтрация 94

 Нагнетательные скважины 62
 Наведенная инфильтрация 10, 215

 Опытные откачки 134, 157
 — наливов 161
 Объемная влажность 164
 Опытный бассейн 165

 Приканальная линза 11, 42, 252
 Продуктивный горизонт 19, 120, 275
 Предварительные фильтры 95
 Предварительная разведка 206
 Параметр гряземкости 169
 — илистого осадка 171, 185
 Пленочная фильтрация 16, 181
 Поглощающая скважина 39

 Разведочная гидрогеология 25
 Режим подземных вод 131, 137

- Сорбционное свойство пород 24
Скорость инфильтрации 165, 182, 190
Сорбция 72, 88
Сорбционная емкость 101
- Техногенные процессы 22
Технические средства 17, 28, 36
Токсичные вещества 70
- Упругие запасы 14, 59
- Фильтрационные свойства 106, 159
Физические показатели 69
Флокуляция 72
- Химические показатели 69
- Эксплуатационные запасы 15, 25,
205, 206, 208
— скважины 278, 292
Эксплуатационная разведка 20, 107
— эффективность 295, 297

Предисловие	3
ГЛАВА I. Содержание комплексной проблемы формирования искусственных запасов пресных подземных вод	7
Из истории возникновения проблемы	7
Основные понятия и определения	13
Основное содержание проблемы	17
Состояние изученности общей проблемы	23
Место гидрогеологических исследований для обоснования искусственного воспроизводства запасов подземных вод в современной гидрогеологии	25
ГЛАВА II. Способы и технические средства искусственного воспроизводства запасов подземных вод	28
ГЛАВА III. Условия формирования искусственных ресурсов и запасов подземных вод	37
Общая характеристика природных факторов	37
Типизация условий формирования искусственных запасов подземных вод	41
ГЛАВА IV. Улучшение качества воды при искусственном восполнении подземных вод	66
Задачи и схемы улучшения качества воды при искусственном восполнении подземных вод	66
Требования к качеству воды, получаемой при искусственном восполнении подземных вод	69
Теоретические основы и практические данные по улучшению качества воды при искусственном восполнении	72
Улучшение качества воды в инфильтрационном бассейне (до инфильтрации)	82
Улучшение качества воды при инфильтрации в бассейне и в зоне аэрации под бассейном	85
Улучшение качества воды в водоносном горизонте	86
Температура искусственно восполняемых подземных вод	89
Требования к качеству воды, подаваемой для искусственного восполнения подземных вод	91

Предварительная водоподготовка	92
Прогноз изменений качества подземных вод при искусственном их восполнении	96
ГЛАВА V. Методика разведочных гидрогеологических работ в связи с искусственным воспроизводством эксплуатационных запасов под- земных вод на действующих водозаборах и новых объектах	105
Общие положения	105
Разведочные гидрогеологические работы на участках действующих водозаборов	107
Разведка эксплуатационных запасов подземных вод на новых место- рождениях с учетом искусственного их воспроизводства	119
ГЛАВА VI. Гидрогеологические исследования с целью обоснования магасинирования подземных вод	127
Общие замечания	127
Исследования на стадии оценочных работ	128
Исследования на стадии поисковых работ	129
Исследования на стадии предварительной разведки	133
Исследования на стадии детальной разведки	135
Разведка для обоснования искусственного создания линз пресных вод	136
ГЛАВА VII. Изучение режима подземных вод при искусственном восполнении их запасов	137
Общие положения	137
Изучение режима подземных и поверхностных вод	141
Рекомендации по размещению наблюдательной сети	149
Наблюдения за техническим состоянием режимной сети и эксплуа- тационных сооружений водозабора	153
ГЛАВА VIII. Опытнo-фильтрационные работы с целью определения исходных гидрогеологических параметров	155
Общие положения	155
Исследования фильтрационных свойств пород при изучении первого типа формирования искусственных запасов подземных вод	159
Исследования фильтрационных свойств пород при изучении второго и третьего типов формирования искусственных запасов подземных вод	161
Полевые фильтрационные исследования в опытных бассейнах	165
ГЛАВА IX. Теоретические и методические основы прогноза работы инфильтрационных сооружений	172
Кольматация пород в инфильтрационных сооружениях	172
Закономерности фильтрации природных вод	175
	309

Анализ теоретических зависимостей для прогноза скорости инфильтрации	177
Расчеты систем искусственного восполнения подземных вод	187
Пример прогнозного расчета скорости инфильтрации	192
Расчет поглощающих скважин	194
ГЛАВА X. Принципы оценки, этапы разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном их восполнении	198
Общие положения и требования	198
Принципы и содержание оценки эксплуатационных запасов подземных вод	201
Этапы оценки эксплуатационных запасов подземных вод при искусственном их восполнении с учетом стадийности исследований	205
ГЛАВА XI. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного восполнения	210
Общие рекомендации	210
Методика оценки эксплуатационных запасов подземных вод для первого типа искусственного питания	215
Методика оценки эксплуатационных запасов подземных вод для второго типа искусственного питания	222
Методика оценки эксплуатационных запасов подземных вод для третьего типа искусственного питания	230
Методика оценки эксплуатационных запасов подземных вод для четвертого типа искусственного питания	242
Методика оценки эксплуатационных запасов подземных вод для пятого типа искусственного питания	252
ГЛАВА XII. Охрана искусственно созданных подземных вод от загрязнений	256
Гидрогеологическое обоснование и организация зон санитарной охраны	256
Рекомендации по охране источника искусственного питания подземных вод от загрязнений	262
Специальные комплексные исследования по охране качества искусственно созданных запасов подземных вод	265
ГЛАВА XIII. Опыт эксплуатации водозабора с искусственным питанием системой инфильтрационных бассейнов	275
Краткая характеристика	275
Разведка объекта и определение гидрогеологических параметров	277
Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с учетом искусственного их восполнения	282

ГЛАВА XIV. Опыт искусственного восполнения запасов подземных вод в Литовской ССР	285
Общие гидрогеологические условия	285
Обоснование системы искусственного восполнения подземных вод	285
Изучение изменений качества исходной воды	290
Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с учетом искусственного восполнения	291
ГЛАВА XV. Гидрогеолого-экономическая оценка при искусственном восполнении подземных вод	295
Список литературы	301
Предметный указатель	306

НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ ПЛОТНИКОВ
НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ПЛОТНИКОВ
КОНСТАНТИН ИГОРЕВИЧ СЫЧЕВ

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИСКУССТВЕННОГО ВОСПОЛНЕНИЯ ЗАПАСОВ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Редактор издательства Л. Н. Федорова
Переплет художника И. Т. Пучкова
Художественный редактор В. В. Евдокимов
Технический редактор О. Ю. Трепенюк
Корректор Р. Т. Баканова

Сдано в набор 28.11.77.
Подписано в печать 11.04.78.
Т-07239. Формат 60 × 90^{1/16}. Бумага № 3.
Гарнитура обычн. Печать высокая. Печ. л. 19.50.
Уч.-изд. л. 21,10. Тираж 3100 экз. Заказ 641/5991-2.
Цена 1 р. 40 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19.
Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
196006, Ленинград, Московский пр., 91.

2538

NEIPA