МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР

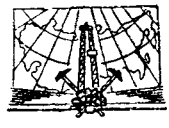
Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО)

Н. Н. БИНДЕМАН, Л. С. ЯЗВИН

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

(МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО)

Второе издание



ИЗДАТЕЛЬСТВО „НЕДРА"
Москва · 1970

УДК 551.49

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. *Н. Н. Биндеман, Л. С. Язвин.* Изд-во «Недра», 1970, стр. 216.

В книге рассматривается методика оценки эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. В первых главах работы проанализированы принципы классификации запасов подземных вод, рассмотрены различные граничные условия водоносных пластов и дана общая характеристика основных методов оценки эксплуатационных запасов — гидродинамического, гидравлического и балансового. Последующие главы посвящены детальной характеристике каждого метода, особенностям его применения в различных гидрогеологических условиях. Отдельная глава посвящена рассмотрению стадийности гидрогеологических исследований и категоризации эксплуатационных запасов подземных вод по степени их изученности. Большое место в работе уделено методам определения основных расчетных параметров (коэффициентов фильтрации, водопроводимости и пьезопроводности) и методике проведения опытных работ для расчета гидрогеологических параметров.

В связи с тем, что в различных гидрогеологических условиях существует ряд специфических особенностей в применении методов оценки эксплуатационных запасов, в отдельных главах книги приведены рекомендации по оценке запасов в артезианских бассейнах горноскладчатых областей, карстовых районах, конусах выноса и пролювиальных шлейфах, междуречьях, речных долинах и районах развития линз пресных вод.

Кроме того, в работе рассмотрен вопрос об оценке эксплуатационных запасов подземных вод в районах их интенсивной эксплуатации.

Иллюстраций — 61, таблиц — 26, библиография — 56 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Потребность в воде для водоснабжения вновь создаваемых и расширяющихся городов, промышленных предприятий и сельскохозяйственных объектов в нашей стране непрерывно возрастает. Особенно острым является вопрос обеспечения водой населения для хозяйственно-питьевых нужд. В связи с этим оценка запасов подземных вод приобрела значение важной государственной задачи. На производство гидрогеологических разведок для выявления эксплуатационных запасов подземных вод ежегодно затрачиваются многие миллионы рублей.

Отчетные материалы по изысканиям свидетельствуют о том, что гидрогеологические работы производятся с достаточно полным учетом геологической обстановки. Однако существенным недостатком изысканий является иногда недостаточная целеустремленность их в части получения данных, необходимых для оценки эксплуатационных запасов подземных вод. К сожалению, оценку запасов иногда рассматривают лишь как элемент камеральной обработки, что приводит к крайне нежелательным последствиям уже после того, как полевые работы закончены и нет возможности получить недостающие данные.

Подземные воды, в отличие от твердых полезных ископаемых, находятся в непрерывном движении и при эксплуатации их запасы извлекаются на обширной территории, значительно превосходящей площадь, на которой расположен водозабор. Поэтому оценка запасов невозможна без тех или иных гидродинамических расчетов. На основании данных поисковых работ, а если они не производились, то по архивным и литературным материалам, гидрогеолог, как правило, имеет уже достаточно ясное представление о геологическом строении и гидрогеологических условиях района для того, чтобы наметить расчетную схему. Такую расчетную схему следует рассматривать как рабочую гипотезу исследователя и составлять ее до начала предварительной разведки. Расчетная схема должна быть заложена в проекте проведения работ, что повышает целенаправленность изысканий и способствует их более экономичному проведению. Конечно, при необходимости схема-гипотеза может уточняться в процессе изысканий и в отдельных случаях даже радикально пересматриваться.

Следовательно, методику гидрогеологических исследований, производящихся для оценки эксплуатационных запасов подземных вод, нельзя отрывать от методики оценки запасов, которой гидрогеолог, выполняющий эти исследования, должен владеть в совершенстве.

Данная книга является вторым изданием книги Н. Н. Биндемана «Оценка эксплуатационных запасов подземных вод», Госгеолтехиздат, 1963 г., нашедшей широкое применение и быстро разошедшейся. Во втором издании дополнены и переработаны главы I и II, посвященные классификации запасов подземных вод и граничным и начальным условиям. Значительно расширены вопросы методики опытных работ и определения расчетных параметров (глава VIII). Добавлена новая глава (XVII), в которой изложены основы оценки эксплуатационных запасов подземных вод в районах действующих водозаборов.

Главы написаны: I—VII, IX, XI—XIV — Н. Н. Биндеманом; VIII, X, XV, XVII — Л. С. Язвиным; XVI — В. Д. Бабушкиным.

Глава I

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАПАСОВ И РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

За последние 15—20 лет опубликован ряд работ, посвященных классификации запасов и ресурсов подземных вод. Обстоятельный обзор этих работ дан в статье Ф. М. Бочевера (1957) и книге Б. И. Куделина (1960).

Все указанные классификации отличаются в сущности лишь большей или меньшей полнотой и детализацией, но не содержат принципиальных противоречий в отношении понимания самого предмета классификации. Вместе с тем в них наблюдается чрезвычайная пестрота и несогласованность терминологии и определений понятий, что приводит к затруднениям в использовании классификаций как в научных работах, так и на практике.

Основной причиной этой несогласованности является прежде всего неправильная и произвольная трактовка понятий «запасы» и «ресурсы» подземных вод. Предельно четко различия этих понятий были сформулированы Ф. П. Саваренским: «Правильнее говорить не о «запасах» подземных вод, а о «ресурсах» подземных вод, понимая под этим термином обеспечение в водном балансе данного района поступления подземных вод и оставляя за термином «запасы» лишь определение тех количеств воды, которые находятся в данном бассейне или слое независимо от поступления воды и расхода, а в зависимости от его емкости».

В конце сороковых годов термин «ресурсы» был незаслуженно отвергнут и заменен термином «динамические запасы», что и привело к стиранию различия понятий «ресурсы» и «запасы» в гидрогеологической литературе и путанице в терминологии. Термин «динамические запасы» является неудовлетворительным и должен быть отвергнут по следующим соображениям. Слово «запас» в русском языке означает запасенное, собранное для будущего использования. Так называемые «динамические запасы», выражающие питание подземных вод, не накоплены заранее и не являются вместе с тем «резервом», так как при эксплуатации подземных вод в первую очередь ориентируются на их использование, считая резервом запасы, накопленные в пласте, а не питание водоносного горизонта.

Запасы подземных вод и их возобновление питанием (ресурсы) с логической и физической точек зрения понятия принципиально

разные, что находит свое отчетливое выражение в размерности этих величин: запасы выражаются массой (приближенно — объемом) воды, а их возобновление — расходом воды.

Различия запасов и ресурсов подземных вод находят выражение в принципиально разном их изменении при эксплуатации. Природные запасы подземных вод при эксплуатации обязательно уменьшаются, так как при откачке всегда происходит понижение уровня воды и, следовательно, то или иное уменьшение ее массы в водоносном горизонте. Наоборот, естественные ресурсы подземных вод при эксплуатации не только не уменьшаются, но в ряде случаев увеличиваются. Понижение напора подземных вод в пласте при откачке может вызвать подток воды из рек, уменьшить испарение с поверхности грунтовых вод, вызвать или усилить переток воды из выше и ниже расположенных водоносных горизонтов через относительно слабо проницаемые слои, окна. Таким образом, при эксплуатации водозаборов запасы подземных вод уменьшаются, а ресурсы возрастают.

Подземная вода, пригодная для использования в народном хозяйстве, является полезным ископаемым. Рассматривая подземную воду с этой точки зрения, необходимо сформулировать то общее, что свойственно запасам твердых и жидких полезных ископаемых, и те различия, которые между ними имеются.

Общность понятия «запас» для твердых полезных ископаемых и воды заключается в следующем: объем (масса) гравитационной воды, как и масса твердого полезного ископаемого, выражает их запасы; объем водоносного пласта аналогичен объему породы, содержащей руду; коэффициент водоотдачи — содержанию руды в породе; состав подземных вод — составу руды.

Месторождение любого полезного ископаемого всегда так или иначе ограничено. Влияние внешней среды, проявляющееся на границах тела полезного ископаемого, принципиально разное для твердых полезных ископаемых и воды. В месторождениях твердых полезных ископаемых влияние окружающей среды на запасы полезного ископаемого проявляется крайне медленно, в «геологических» темпах (процессы выветривания, метаморфизм и т. п.) и при добыче полезного ископаемого влияние этих процессов может не учитываться. Наоборот, влияние окружающей среды на запасы подземных вод проявляется весьма быстро; оно передается водоносному горизонту через его границы и через них же, в свою очередь, водоносный горизонт влияет на окружающую среду. Характер граничных условий обусловливает степень возобновляемости запасов, а изменения этих условий во времени вызывают соответственные изменения величины запасов подземных вод.

Другое отличие запасов подземных вод от запасов твердых полезных ископаемых, также связанное с подвижностью воды, заключается в том, что запасы подземных вод, которые предполагается использовать, зависят от способности пород проводить

воду и передавать изменения напора. При прочих равных условиях из водоносного горизонта можно получить воды тем больше, чем больше водопроводимость пласта, т. е. произведение коэффициента фильтрации на мощность. Пласты водоносного галечника и песка-плывуна могут содержать равные объемы гравитационной воды, т. е. равные запасы, однако для получения того же количества воды из галечников потребуются значительно меньшее число скважин и меньшие понижения в них. Таким образом, гидродинамические свойства пласта имеют огромное значение при характеристике запасов, определяя технико-экономическую целесообразность их использования в народном хозяйстве.

Запасы и ресурсы подземных вод можно подразделить по их генезису на следующие виды: 1) естественные запасы и ресурсы; 2) искусственные запасы и ресурсы; 3) привлекаемые ресурсы.

Естественные запасы — масса гравитационной воды в пласте в естественных условиях. Та часть этой массы, которая может быть извлечена из напорного водоносного горизонта за счет упругих свойств воды и горных пород без осушения пласта, называется упругими запасами. При оценке запасов подземных вод для водоснабжения (пресные воды) запасы удобнее выражать не массой, а объемом воды, так как численно значения единицы массы и объема воды в этом случае достаточно близки. В такой приближенной трактовке естественные запасы равны сумме объема воды, заключенной в пласте (эти запасы иногда называют «емкостными»), и объема воды, извлекаемой в напорных условиях без осушения пласта («упругие запасы»). Величина последних по сравнению с емкостными запасами обычно составляет доли процента.

Естественные ресурсы водоносного горизонта — это его питание в естественных условиях. Питание следует рассматривать как алгебраическую сумму поступления воды (инфильтрация атмосферных осадков, фильтрация из рек, перетекание из выше и ниже расположенных горизонтов) и расходования ее (за счет испарения вод, оттока в выше и ниже расположенные горизонты). Естественные ресурсы находят свое выражение в расходе потока подземных вод.

Искусственные запасы подземных вод — это их объем в пласте, образовавшийся в результате орошения, подпора водохранилищами, искусственного заводнения пласта (магазинирование).

Искусственные ресурсы подземных вод — питание водоносных горизонтов при фильтрации из каналов и водохранилищ, на площадях орошения, при целенаправленных мероприятиях по усилению их питания. Искусственные ресурсы, как и естественные, имеют размерность расхода.

Привлекаемые ресурсы — усиление питания подземных вод, вызванное образованием депрессионных воронок при

эксплуатации водозаборов (возникновение или усиление фильтрации из рек, увеличение питания грунтовых вод атмосферными осадками вследствие уменьшения испарения с поверхности грунтовых вод при удалении их зеркала от поверхности земли).

При эксплуатации подземных вод используются в той или иной мере все перечисленные выше виды ресурсов и запасов подземных вод.

В отношении эксплуатационных запасов и ресурсов подземных вод, по сложившимся условиям, терминология отличается. Определение понятия эксплуатационных запасов регламентируется официальной инструкцией Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых (ГКЗ).

Эксплуатационные запасы подземных вод — количество подземных вод, которое может быть получено рациональными в технико-экономическом отношении водозаборными сооружениями при заданном режиме эксплуатации и при качестве воды, удовлетворяющем требованиям в течение всего расчетного срока водопотребления. Количество воды, о котором идет речь в приведенном выше определении, рекомендуется выражать расходом воды. Следовательно, строго говоря, речь идет не об эксплуатационных запасах, а об эксплуатационных ресурсах водоносного горизонта. С термином эксплуатационные запасы можно согласиться лишь с практической точки зрения — ГКЗ утверждает запасы полезных ископаемых (подавляющая их часть — твердые ископаемые, где термин «запасы» является точным), а не ресурсы.

Термин «эксплуатационные ресурсы» применяется при прогнозных оценках в региональном плане, как характеристика потенциальных возможностей эксплуатации подземных вод в том или ином крупном регионе.

Эксплуатационные запасы (ресурсы) подземных вод связаны с другими видами запасов и ресурсов следующим балансовым уравнением:

$$Q_э = Q_е + \frac{V_е}{t} + Q_и + \frac{V_и}{t} + Q_п, \qquad (I, 1)$$

где $Q_э$ — эксплуатационные запасы (ресурсы); $Q_е$ — естественные ресурсы; $V_е$ — естественные запасы; $Q_и$ — искусственные ресурсы; $V_и$ — искусственные запасы; $Q_п$ — привлекаемые ресурсы; t — время эксплуатации.

Эксплуатационные запасы (ресурсы) по возможному сроку их использования могут быть обеспеченными на неограниченное время и обеспеченными только на определенный срок эксплуатации, принимаемый обычно равным сроку амортизации водозабора (25—30 лет), а при оценке прогнозных ресурсов в региональном плане — порядка 50—100 лет.

Относительное значение компонентов балансового уравнения изменяется в зависимости от времени эксплуатации подземных вод и сопутствующих технических мероприятий.

Естественные ресурсы ($Q_е$) и естественные запасы ($V_е$) независимы от деятельности человека, при этом с течением времени значение использования естественных запасов уменьшается и при $t \to \infty$ второй член уравнения (I,1) обращается в нуль.

Искусственные ресурсы и запасы управляются инженерной деятельностью человека, поэтому они могут изменяться в процессе эксплуатации.

При периодическом заводнении поверхностным стоком емкостей, сформированных откачкой («подземные водохранилища»), значение искусственных запасов ($V_и$) в водном балансе может оказаться весьма существенным независимо от длительности периода эксплуатации, так как время расходования этих запасов незначительно (обычно менее года), после чего они восстанавливаются.

Привлекаемые ресурсы ($Q_п$) в процессе эксплуатации водозабора увеличиваются в связи с ростом депрессии, создаваемой откачкой и вызывающим усиление питания подземных вод из поверхностных вод и из атмосферы. Если величина привлекаемых ресурсов с течением времени становится близкой к расходу водозабора ($Q_в$), то движение подземных вод практически стабилизуется и водозабор оказывается обеспеченным ресурсами на неограниченный срок эксплуатации. Примерами таких условий могут служить водозаборы, заложенные вблизи рек, а также водозаборы, в зоне влияния которых при понижении уровня грунтовых вод испарение с их поверхности уменьшается на величину, близкую к дебиту водозабора.

Естественные запасы и ресурсы, искусственные запасы и ресурсы и запасы, привлекаемые в процессе эксплуатации водозаборного сооружения, являются элементами приходной части водного баланса, определение которых имеет важное значение при региональной оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод. Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод на отдельных участках водоносного горизонта определять эти элементы водного баланса в большинстве случаев нет необходимости, так как при расчетах эксплуатационных запасов современными гидродинамическими методами эти элементы учитываются совокупно.

Глава II

НАЧАЛЬНЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ

Оценка эксплуатационных запасов на том или ином участке распространения водоносного горизонта заключается в определении величины допустимого понижения уровня воды в скважинах, при котором обеспечивается извлечение ее на поверхность с требуемым дебитом и качеством неограниченно долгое время или в течение определенного срока. Если это условие в процессе эксплуатации соблюдается, т. е. уровень воды в скважинах не понижается до подошвы водоносного пласта и не превышает глубины, при которой воду можно извлекать на поверхность насосами, то эксплуатационные запасы являются обеспеченными.

Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод необходимо знать распределение напоров в пласте или системе пластов, если они взаимосвязаны (начальное условие), и закон взаимодействия между окружающей средой и водоносными горизонтами (граничные условия).

За начальное условие принимается распределение напоров в водоносном пласте и на его границах к моменту начала эксплуатации. При расчетах эксплуатационных запасов подземных вод обычно принимается, что движение подземных вод непосредственно перед эксплуатацией водозабора было установившимся. Такое допущение в большинстве случаев не приводит к существенным для практики ошибкам, поскольку изменения напоров подземных вод при эксплуатации значительно больше, чем в естественных условиях, а потому естественными колебаниями уровня можно пренебрегать. Лишь в тех гидрогеологических условиях, которые характеризуются значительными амплитудами колебаний уровня подземных вод (приречные зоны, карстовые районы, конусы выноса), учет естественного режима подземных вод обязателен. В качестве исходных данных при оценке запасов в этих случаях следует принимать положение низких (меженных) уровней воды.

Граничные условия определяют основные наиболее принципиальные закономерности режима подземных вод. В естественных условиях изменения во времени, происходящие на границах пласта (изменение инфильтрации атмосферных осадков, уровней воды в реках), обусловливают режим подземных вод, который является как бы отражением изменяющихся условий на границах.

При эксплуатации подземных вод внутри пласта возникает новое граничное условие, выражающееся расходом воды (водозаборы с заданным дебитом) или понижением (водозаборы с заданным динамическим уровнем). Дать прогноз изменения во времени понижения уровня воды в скважинах (если задан дебит водозабора) или изменения дебита (если заданы динамические уровни) можно только тогда, когда известны граничные условия водоносного пласта. Так, если водоносный пласт примыкает

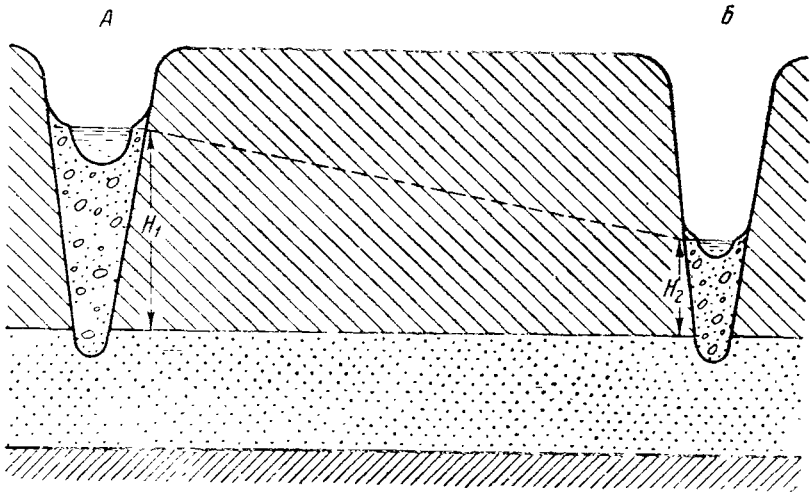


Рис. 1.

к реке, то при эксплуатации подземных вод через некоторое время происходит стабилизация понижений уровней воды в скважинах водозабора. Если, наоборот, водоносный пласт оконтурен в плане выходами водоупорных пород, то движение подземных вод к водозабору имеет резко выраженный неустановившийся характер и через некоторое время после начала эксплуатации может произойти истощение водоносного горизонта.

Значение учета граничных условий при оценке эксплуатационных запасов подземных вод можно иллюстрировать следующим примером.

Допустим, что имеются два междуречья, тождественные по геологическим условиям (рис. 1 и 2). Долины рек вскрывают напорный водоносный горизонт, перекрытый в пределах междуречья водоупорным пластом. Различие сравниваемых участков заключается лишь в том, что на одном из них (см. рис. 1) уровни воды в ограничивающих реках $А$ и $Б$ разные (H_1 и H_2), причем $H_2<H_1$, на другом участке (см. рис. 2) — одинаковые (H_1).

Рассматривая эксплуатационные запасы как сумму естественных запасов и естественных ресурсов подземных вод, выражаемых расходом естественного потока, и пренебрегая граничными

условиями, можно прийдти к выводу, что на участке *I* эксплуатационные запасы больше, чем на участке *II*, так как при равенстве естественных запасов на сравниваемых участках на участке *I* имеет место расход потока, а на участке *II* он отсутствует в силу равенства отметок уровней воды в ограничивающих реках *А* и *Б*. Заключение о больших эксплуатационных запасах подземных вод участка *I* по сравнению с участком *II*, основанное на этих соображениях, было бы, конечно, ошибочным. В самом деле, на уча-

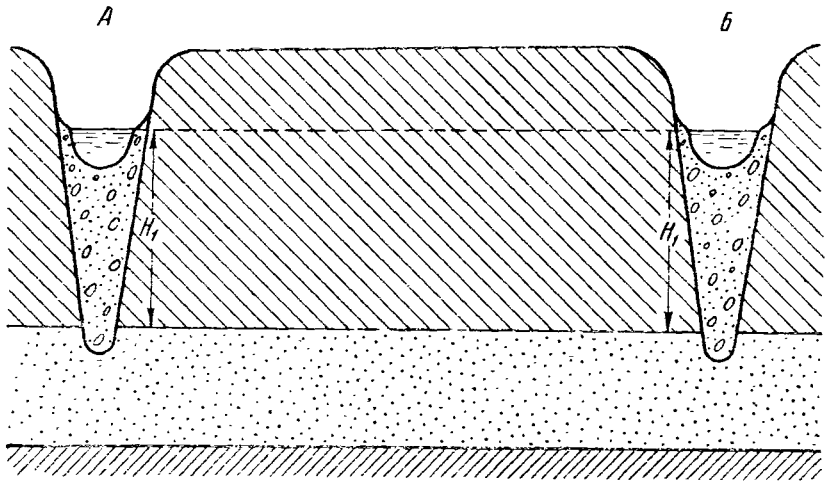


Рис. 2.

стке *II* эксплуатационные запасы значительнее, так как напор над кровлей водоносного горизонта больше, что позволяет эксплуатировать скважины водозабора с бóльшими понижениями уровня воды, а следовательно, и с бóльшими дебитами.

Итак, суждение об эксплуатационных запасах подземных вод по расходу естественного потока может приводить не только к неточному, но в некоторых случаях и к принципиально неверному выводу об эксплуатационных запасах подземных вод.

Расход подземного потока, выражающий естественные ресурсы подземных вод, может рассматриваться лишь как нижний предел величины эксплуатационных запасов, поскольку при этом не учитываются остальные члены правой части балансового уравнения (I, 1).

Если обратиться к граничным условиям сравниваемых участков, то станет совершенно очевидным, что эксплуатационные запасы на участке *II* (рис. 2) больше, чем на *I* (см. рис. 1), так как на границе пласта (в долине *Б*) горизонт воды выше.

Главнейшие типы граничных условий водоносных пластов описаны в работе Ф. М. Бочевера (1958). Типизация их нами несколько дополнена и расширена.

Следует различать границы в вертикальном разрезе водоносного пласта (верхние и нижние границы пласта) и в плане (контуры пласта).

Границы водоносного пласта имеют сложное очертание и для приведения задачи оценки эксплуатационных запасов к расчетному виду всегда приходится прибегать к той или иной схематизации формы границ. Естественно, чем ближе расчетная схема к природным условиям, т. е. чем меньше будет допущено искажений при схематизации, тем прогнозы точнее.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ ПЛАСТА

Подземные воды, как известно, подразделяются на напорные и безнапорные.

Отличие напорных и безнапорных вод обусловливается разными граничными условиями на верхней поверхности водоносного горизонта. В безнапорных водах эта поверхность свободная, а в напорных она определяется положением подошвы кроющего водоупорного пласта.

Принципиальное отличие указанных граничных условий заключается в том, что при эксплуатации водозабора в безнапорных водах обязательно происходит то или иное осушение пласта, т. е. мощность водоносного горизонта уменьшается, в то время как в условиях напорных вод мощность остается неизменной, если уровень воды при откачке не понижается ниже кровли. Переход от более простых формул напорных вод к несколько более сложным формулам безнапорных вод очень прост и заключается в том, что при применении формул напорных вод в условиях безнапорных вод необходимо величину мощности водоносного пласта заменить средней мощностью ($h_{ср}$), равной полусумме мощностей пласта до откачки (H) и при откачке (h_0). Учитывая, что $H-h_0=S$, где S — понижение уровня воды при откачке,

$$h_{ср}=\frac{H+h_0}{2}=\frac{H+(H-S)}{2}=H-\frac{S}{2}. \qquad \text{(II, 1)}$$

Таким образом, средняя мощность водоносного пласта меньше первоначальной (существовавшей до откачки) на половину понижения уровня воды при откачке.

Такая замена, как доказывается в теории, является вполне строгой в условиях установившегося движения и практически допустима также для решения задач неустановившегося движения.

На верхней границе водоносного пласта со свободной поверхностью подземных вод могут быть следующие условия:

1) питание инфильтрацией атмосферных осадков (рис. 3, участок *I*); 2) отсутствие питания и испарения (участок *II*); 3) испарение с поверхности подземных вод (участок *III*).

Первый тип граничных условий является наиболее распространенным, третий свойствен в основном аридной зоне. Отсутствие питания и испарения имеет место в тех случаях, когда подзем-

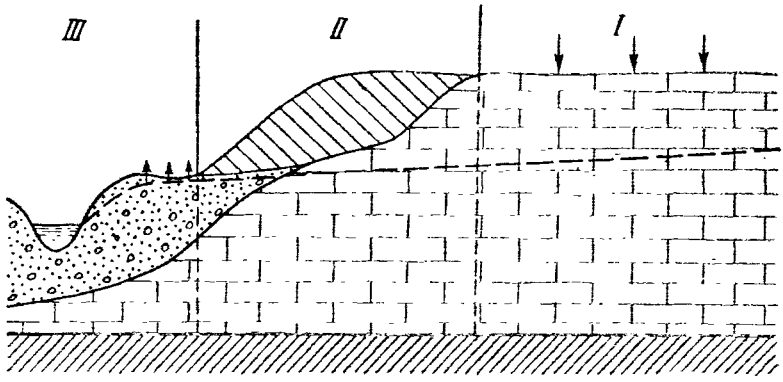


Рис. 3. Схема условий на верхней границе водоносного пласта. Пунктиром показан уровень грунтовых вод с различными граничными условиями (*I*, *II*, *III*)

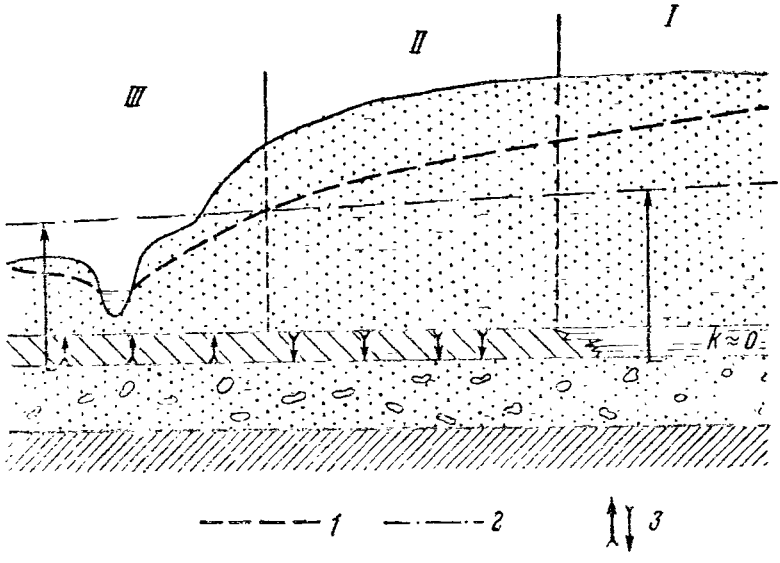


Рис. 4. Схема условий на нижней границе водоносного пласта.

1 — уровень грунтовых вод; *2* — пьезометрический уровень артезианских вод; *3* — направление перетекания подземных вод через слабопроницаемый слой

ные воды залегают относительно глубоко, а выше лежит слой непроницаемых пород (так называемые межпластовые безнапорные воды).

На нижней границе (подошве) водоносного пласта (рис. 4) могут быть следующие условия: 1) подстилающий пласт практически непроницаем (водоупор, участок *I*); 2) подстилающий пласт

слабо проницаем, причем под ним залегает водоносный горизонт, напор в котором меньше напора в грунтовых водах, вследствие чего возможен отток воды сверху вниз через относительно слабопроницаемую подошву (участок *II*); 3) те же условия, но напор в нижележащем водоносном горизонте больше, вследствие чего происходит восходящее движение воды и питание грунтовых вод через подошву пласта (участок *III*).

Рассмотрим граничные условия водоносных пластов, к которым приурочены напорные воды. Если кровля и подошва пласта сложены выдержанными водоупорами, то питание водоносного

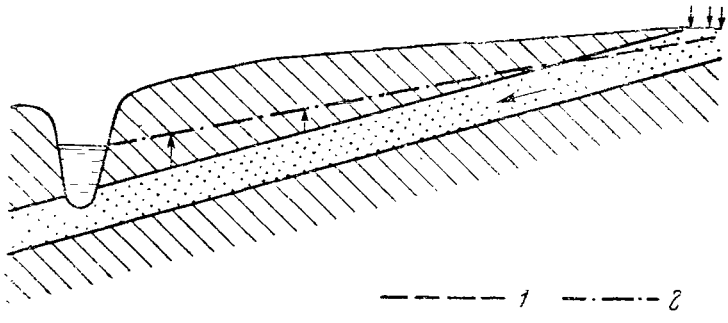


Рис. 5. Схема питания и разгрузки подземных вод

1 — уровень безнапорных вод; *2* — пьезометрический уровень напорных вод

горизонта может происходить только в области, где водоупорная кровля выклинивается и водоносный пласт имеет свободную поверхность, а разгрузка — только в зоне, где долины рек прорезают водоупорную кровлю (рис. 5).

Если пласт, к которому приурочены напорные воды, отделяется от выше- и нижеследующих водоносных горизонтов слабопроницаемыми слоями, то происходит перетекание воды из одного пласта в другой под влиянием разности напоров. На рис. 6 показана взаимосвязь водоносных горизонтов, из которых *I* имеет свободную поверхность, а *II* и *III* являются напорными.

Рассмотрим граничные условия пласта *II*. На его верхней границе в пределах участка BC происходит приток воды из вышележащих грунтовых вод, свободная поверхность которых выше, чем пьезометрическая поверхность напорных вод пласта *II*. На участке *AB* грунтовые воды подпитываются напорными водами из горизонта *II*. Горизонт *III*, имеющий более высокую пьезометрическую поверхность, на протяжении всего участка *AC* подпитывает *II* водоносный горизонт.

При эксплуатации водозабора вследствие понижения напора на тех участках, где водоносный горизонт в естественных условиях получал питание путем перетекания, оно усилится, а там, где происходил отток, последний уменьшится или даже заменится питанием.

Соотношение напоров по вертикали имеет важное значение не только как фактор питания водоносного горизонта, но и как условие, определяющее химический состав подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта. Если выше или ниже эксплуатируемого водоносного горизонта залегают воды повышенной минерализации, то перетекание воды при соответствующих соотношениях напоров в этажнорасположенных горизонтах может привести к ухудшению качества воды в водозаборе.

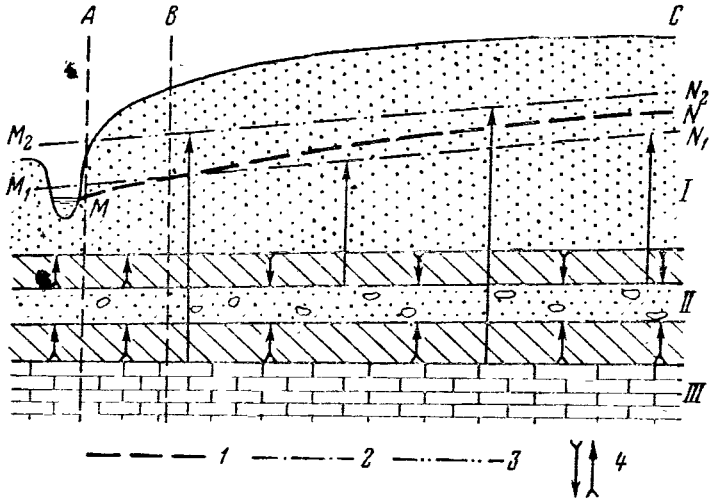


Рис. 6. Схема взаимосвязи водоносных горизонтов

1 — уровень грунтовых вод (*MN*); *2* — пьезометрический уровень напорных вод горизонта *II* (M_1N_1); *3* — пьезометрический уровень напорных вод горизонта *III* (M_2N_2); *4* — направление перетекания подземных вод через слабопроницаемые слои

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ В ПЛАНЕ

Если депрессия, вызываемая эксплуатацией водозабора, распространяется до границ водоносного пласта в плане (контуров пласта), то эти границы оказывают влияние на эксплуатационные запасы подземных вод. Однако даже при длительной эксплуатации на расстоянии от водозабора порядка 10 и очень редко 20—25 *км* понижения уровней воды очень малы. Поэтому во многих случаях при расчетах эксплуатационных запасов влиянием границ можно пренебречь и рассматривать пласт как практически неограниченный.

Типизация граничных условий производится по признаку постоянства или изменения напора и расхода подземных вод на границе в условиях эксплуатации. При этом принимается, что если границы пласта находятся «в бесконечности», расход воды и напор на границах при эксплуатации водозабора не изменяются.

Если водоносный пласт ограничен поверхностным водотоком или водоемом, с которым подземные воды имеют непосредствен-

ную гидравлическую связь, то напор на границе пласта определяется положением горизонта воды в реке, озере и не изменяется при эксплуатации водозабора. Подобного рода граница называется границей с постоянным напором (H-const), причем слово «постоянный» в данном случае надо понимать не в смысле неизменности напора во времени (напор меняется при изменениях горизонта реки или озера), а в смысле его независимости от работы водозабора. Расход потока на границе водоносного пласта при эксплуатации может изменяться не только по величине, но и по знаку. Так, если в естественных условиях поток грунтовых вод был направлен к реке, то при эксплуатации водозабора может возникнуть течение в противоположном направлении — от реки вглубь берега.

Другой тип границы характеризуется примыканием водоносного пласта к водоупорным породам. В этих условиях под влиянием откачки напор на границе водоносного пласта будет понижаться, но расход подземных вод на границе не изменится (Q=const). Представим себе, что с водоупорного цоколя из водоносного горизонта A стекает вода, поступающая в водоносный горизонт B, не имеющий гидравлической связи с горизонтом A (рис. 7). Совершенно ясно, что откачка из водоносного горизонта B не может изменить расхода потока на его границе. При отсутствии притока из вышерасположенного горизонта постоянный расход воды на границе пласта равен нулю. Этот «частный» случай является самым распространенным в природе, так как обычно расход воды на водоупорной границе очень мал и им можно пренебречь.

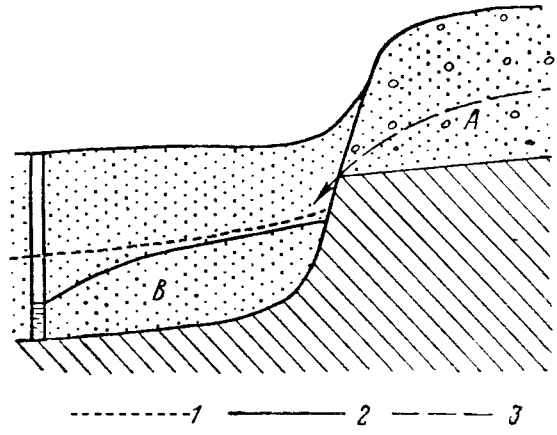


Рис. 7. Схема водоносного горизонта с постоянным расходом на границе

1 — уровень грунтовых вод в пласте *B* до эксплуатации; *2* — то же при эксплуатации; *3* — уровень грунтовых вод в пласте *A*

Тип граничных условий оказывает решающее значение на процесс формирования депрессионной воронки. Первое время, пока понижение уровня не распространилось до границ пласта, последние практически не оказывают влияния на формирование депрессионной воронки и она развивается так же, как в неограниченном пласте. С течением времени влияние границ пласта все более усиливается, причем оно принципиально различно, если границами являются реки (условие постоянства напора) или водоупорные породы (постоянство расхода).

Если водоносный пласт ограничен рекой, с которой подземные воды гидравлически связаны, то при распространении депрессии

подземных вод до границы пласта через короткое время происходит практическая стабилизация уровней воды в скважинах водозабора. Сравнивая эти условия с теми, которые имеют место в неограниченном водоносном пласте, легко убедиться, что первые являются более благоприятными, так как река ограничивает рост депрессии. В неограниченном потоке депрессия распространялась бы все далее и далее; уровни воды в скважинах с постоянным дебитом непрерывно снижались бы и оказались ниже, чем в условиях пласта, ограниченного рекой.

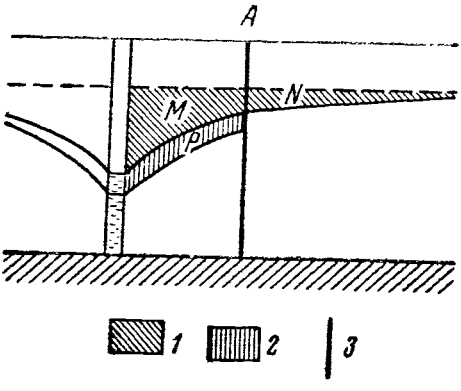


Рис. 8. Схема осушения неограниченного и ограниченного водоносных пластов

1 — зона осушения в условиях неограниченного пласта; *2* — зона дополнительного осушения пласта, вызванная влиянием водонепроницаемой границы; *3* — непроницаемый контур

В случае контакта водоносного пласта с водоупорными породами, при эксплуатации подземных вод, стабилизация депрессии не наступает и скорость понижения уровня во времени оказывается больше, чем в пласте неограниченных размеров. Представим себе, что на некоторый момент времени депрессия распространилась до водоупорной границы *A* (рис. 8). При отсутствии этой границы пласт осушался бы как в области между скважиной и сечением *A*, так и за ее пределами. Приток воды в скважину обеспечивался бы осушением зоны *M* и *N*. Если точка *A* находится на водоупорном контуре пласта, то из зоны *N* вода не поступает, в связи с чем при том же расходе увеличивается отбор воды из зоны, находящейся между скважиной и контуром *A*. Поэтому снижение уровня воды в водоносном пласте будет происходить быстрее, чем в неограниченном пласте (дополнительно будет осушена зона *P*).

В некоторых гидрогеологических условиях при эксплуатации водозабора изменяются и расход, и напор потока на границе. Такие условия свойственны, например, конусам выноса, сложенным в верхней части склона преимущественно галечниками, а в нижней — мелкозернистыми, суглинистыми породами. Подземные воды в галечниках испытывают подпор и на контакте с суглинками выходят источники (рис. 9).

В процессе эксплуатации водозабора, расположенного вблизи выхода источников, дебит последних будет постепенно уменьшаться, т. е. расход потока на границе окажется переменным, при этом напор, соответствующий отметке выхода источников, сохранится. Однако через некоторое время источники могут иссякнуть; расход на границе станет равным нулю, а напор будет падать во времени. Таким образом, эксплуатация подземных вод конуса вы-

носа сопровождается изменением на границе как расхода, так и напора подземных вод.

В рассмотренных выше схемах положение границы водоносного пласта в плане оставалось неизменным. Более сложным случаем является перемещение контура питания водоносного горизонта под влиянием эксплуатации. Для примера рассмотрим следующие условия. Грунтовые воды зандровых и древнеаллювиальных равнин залегают на небольшой глубине. Уровень грунтовых вод, повышающийся от речных долин к водоразделу, на не-

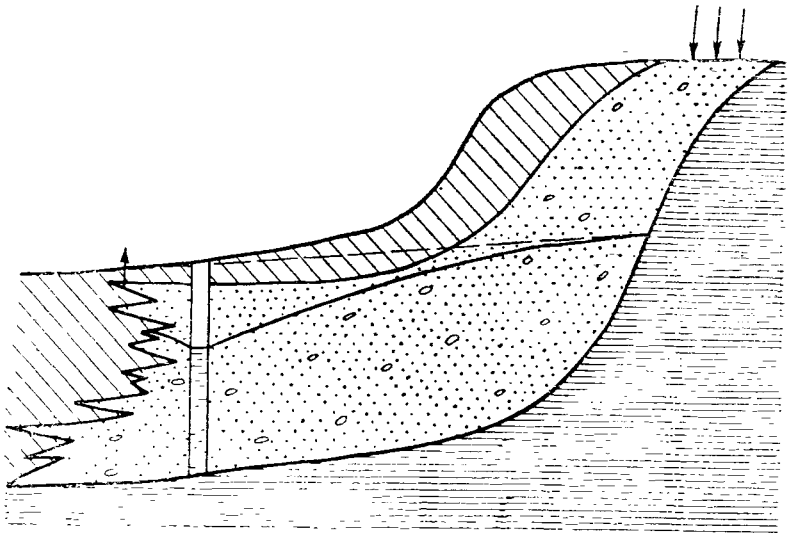


Рис. 9.

котором удалении от рек достигает поверхности земли, где происходит заболачивание междуречья (рис. 10). В этой области движение грунтовых вод в горизонтальном направлении практически отсутствует, выпадающие осадки периодически повышают их уровень, который затем снова понижается вследствие испарения.

Следовательно, питание грунтовых вод за многолетний период на этом участке равно нулю, и точка A может считаться находящейся на контуре питания грунтового потока, направленного к реке. При работе водозабора граница области питания водоносного горизонта переместится от точки A к точке B и уровень грунтовых вод в зоне AB окажется на глубинах, где испарение с поверхности грунтовых вод практически невозможно. Это вызовет увеличение питания водоносного горизонта атмосферными осадками, однако условия на границе не изменятся: напор и расход (равный нулю) останутся теми же, что до эксплуатации водозабора.

Приведем другой пример перемещения границы питания. Водоупорное ложе водоносного пласта имеет небольшой уклон и вы-

ходит на поверхность земли (рис. 11). Положение уровня подземных вод определяется равновесием между величиной питания водоносного горизонта и его естественным расходом по пласту. Поскольку понижение уровня воды в водозаборе обязательно приводит к увеличению уклона потока по сравнению с естествен-

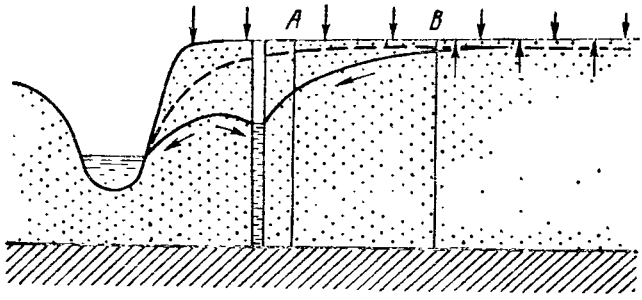


Рис. 10.

ным уклоном, то расход водозабора уже не может компенсироваться питанием водоносного пласта атмосферными осадками и пласт начнет осушаться, причем граница будет перемещаться

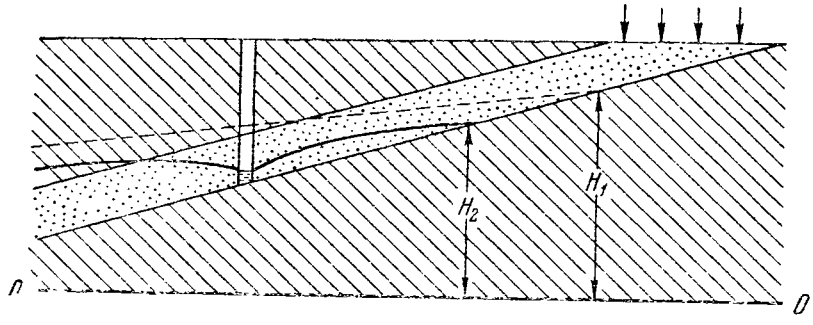


Рис. 11.

в направлении к водозабору. Чем меньше угол наклона водоупора, тем больше смещение границы. Одновременно с перемещением границы происходит уменьшение напора ($H_2 < H_1$), чем этот случай и отличается от предыдущего.

В табл. 1 приведены характерные типы границ в плане.

Работа водозабора может находиться под влиянием одной, нескольких или всех границ, оконтуривающих область распространения водоносного пласта. При этом выделяется несколько основных типовых схем граничных условий.

1. На работу водозабора оказывает влияние только одна граница, остальные границы удалены за пределы возможного влияния откачки, а поэтому рассматриваются как находящиеся «в бесконечности». Такие пласты называются полуограниченными. Примером может служить случай расположения скважин вблизи реки

Таблица 1

Положение границ	Изменение напора и расхода на границе при эксплуатации	Рисунок
Неподвижные	Напор и расход постоянные (неограниченный пласт)	—
	Напор постоянный, расход изменяющийся . . .	—
	Напор изменяющийся, расход постоянный . . .	7
	Напор и расход изменяющиеся	9
Перемещающиеся	Напор и расход постоянные	10
	Напор изменяющийся, расход постоянный . . .	11

при большой ширине междуречья, сложенного водопроницаемыми породами.

2. Режим работы водозабора зависит от влияния двух более или менее параллельных границ, остальные две границы рассматриваются как «бесконечно удаленные от водозабора», который располагается как бы в полосе (отсюда и название этих граничных условий пласт-полоса). Такие условия свойственны, например, нешироким междуречьям, когда под влиянием откачки депрессия распространяется до обеих ограничивающих рек.

3. При работе водозабора его влияние распространяется до всех границ водоносного пласта. Эта расчетная схема является схемой ограниченного пласта, причем контур пласта рассматривается в первом приближении как круговой. Примером могут служить небольшие артезианские структуры горноскладчатых областей брахисинклинального типа, когда при эксплуатации водозабора депрессия может охватывать весь водоносный пласт.

Если условия на всех границах одинаковые, то такие границы называются однородными, если различные — разнородными. Водоносный пласт, приуроченный к междуречью, ограниченному реками, служит примером однородных границ. Водоносный горизонт в аллювиальных отложениях террасы, примыкающей с одной стороны к водоупорным коренным породам, с другой — к реке, имеет разнородные границы.

Условия на границах водоносного пласта выражают взаимосвязь подземных вод, движущихся в пласте, с окружающей средой — атмосферой, выше- и нижерасположенными водоносными горизонтами, реками и др. Однако на режим подземных вод в районе водозабора оказывают влияние не только границы пласта, иногда достаточно удаленные, но и степень неоднородности пласта в зоне влияния откачки из водозабора. В некоторых случаях неоднородность столь существенна, что в пределах водоносного пласта необходимо производить соответствующее районирование и выделять границы, которые в отличие от рассмотренных ранее внешних границ можно называть внутренними.

Изменение водопроводимости в одних случаях происходит более или менее постепенно (фациальные изменения), и в этом

случае определение положения внутренней границы пласта, разделяющей две области фильтрации, оказывается довольно условным. Во многих случаях, однако, граница, на которой происходит изменение величины водопроводимости, выражена очень четко (например, на контакте аллювиальных отложений двух речных террас, водопроницаемость которых существенно отличается).

Неоднородным может быть и состав подземных вод. Часто в пределах одного, достаточно однородного по фильтрационным свойствам водоносного пласта, минерализация подземных вод резко изменяется в разрезе и плане. Такие условия свойственны, например, морским побережьям, линзам пресных вод в пустынных областях, аллювиальным отложениям долин в аридных областях, имеющих временные водотоки. Особенностью этих внутренних гидрохимических границ является их подвижность. Положение поверхностей раздела пресных и высокоминерализованных подземных вод имеет весьма большое значение для оценки эксплуатационных запасов подземных вод на участке расположения водозабора, так как при его эксплуатации положение границы раздела может существенно изменяться и угрожать качеству воды, используемой для водоснабжения.

Глава III

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод заключается в получении доказательств возможности эксплуатации подземных вод при заданном дебите водозабора в течение определенного срока его работы или неограниченно долгое время. Эта задача в конечном итоге сводится к прогнозу понижений динамических уравнений воды в скважинах водозабора.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод производится гидродинамическими, гидравлическими и балансовыми методами.

Оценка запасов гидродинамическими методами заключается в расчетах по соответствующим формулам, выведенным из основных уравнений математической физики и теоретической гидродинамики. Исходные дифференциальные уравнения и получаемые из них формулы являются достаточно строгими с физической и математической точек зрения.

Дифференциальные уравнения гидродинамики являются одновременно и динамическими и балансовыми, поэтому существующее у некоторых гидрогеологов мнение, что формулы гидродинамики якобы не учитывают баланс подземных вод и, следовательно, не могут служить для оценки возобновляемости запасов, является неправильным.

Дифференциальные уравнения гидродинамики учитывают сопротивления движению воды в пласте и водный баланс в каждом бесконечно малом элементе потока, а при интегрировании уравнений — в потоке в целом в пределах заданных границ.

Выделим в потоке подземных вод в пределах депрессионной кривой, формирующейся при откачке из галереи неограниченной длины, элемент длиной dx (рис. 12). В этот элемент справа через грань A поступает расход q_1, слева через грань B вытекает вода с расходом q_2. Для упрощения примем, что сверху и снизу вода в элемент не поступает. Поскольку при откачке воды из галереи уровень воды в ней понижен, то расход через грань B, обращенную в сторону галереи, больше расхода, проходящего через грань A. Таким образом, за время dt объем воды в элементе уменьшается на величину $dv = (q_2 - q_1) \cdot dt$. Этот же объем может

быть выражен через величину понижения уровня воды в элементе dh и водоотдачу μ.

Приравнивая выражения объемов, получим:

$$(q_2 - q_1) \cdot dt = \mu \cdot dh \cdot dx. \qquad \text{(III, 1)}$$

Левая часть уравнения (III, 1) отражает динамику потока и зависит от сопротивления движению воды в пласте, правая — баланс воды в элементе. Уравнение позволяет найти как скорость понижения уровня воды $\frac{dh}{dt}$ в любой точке кривой депрессии, так и объем воды, расходуемый из естественных запасов подземных вод в любом элементе в единицу времени ($\mu \frac{dh\,dx}{dt}$). Таким образом, пользуясь уравнениями гидродинамики, можно дать прогноз изменения уровней воды в скважинах водозабора в процессе его эксплуатации, т. е. установить обеспеченность эксплуатационных запасов.

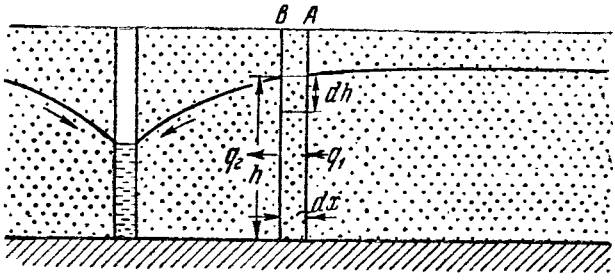


Рис. 12.

Уравнения гидродинамики уже учитывают баланс потока подземных вод, поэтому при использовании гидродинамических методов для оценки и эксплуатационных запасов не требуется определять ни расхода потока подземных вод в естественных условиях, ни величины питания инфильтрацией атмосферных осадков. Покажем это на некоторых примерах.

Более 70 лет назад выдающийся русский ученый Н. Е. Жуковский теоретически доказал, что «понижение уровня нортона в случае колодца, заложенного в подпочвенном потоке жидкости, то же, что и при отсутствии потока» (1948).

Физический смысл этого положения заключается в следующем. Представим себе, что в потоке подземных вод заложена скважина, работающая с постоянным дебитом. При однородности пласта возмущение, вызванное откачкой, распространяется с равной скоростью по всем направлениям, т. е. изолинии понижений уровня являются концентрическими окружностями.

Допустим, что на некоторый момент времени влияние откачки практически распространилось на расстояние R_t (рис. 13). К полуокружности, ограничивающей область влияния откачки вверх по потоку от скважины, поступает расход естественного потока подземных вод, но такое же количество воды оттекает от полуокружности, находящейся ниже скважины с «теневой» стороны. Следовательно, приток и отток к периферии депрессии равны и от-

качка происходит в тех же условиях, что и в бассейне подземных вод.

Положение, доказанное Н. Е. Жуковским для неограниченного пласта, справедливо и для водоносного пласта, ограниченного

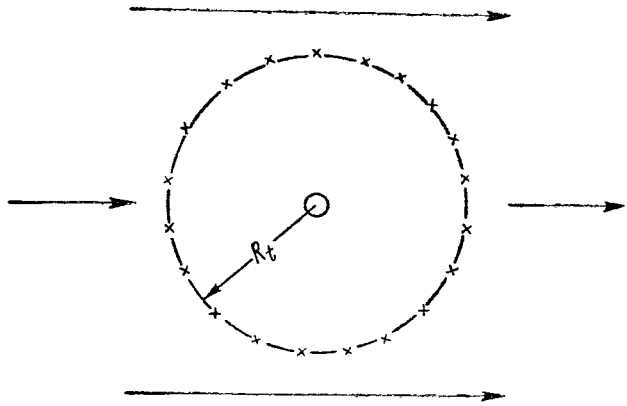


Рис. 13. Схема откачки в неограниченном пласте

Окружность с крестиками — круговой контур, величина понижения уровня на котором при откачке на момент t равна нулю; стрелками указано направление естественного потока

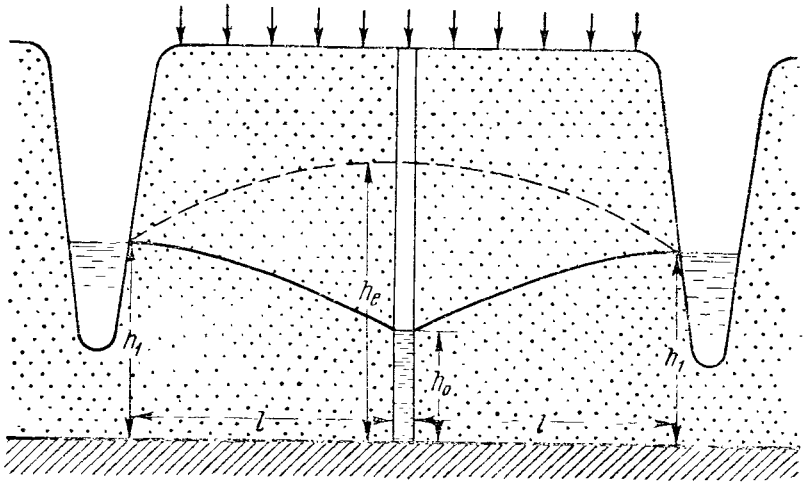


Рис. 14.

реками или одной рекой, независимо от того, получает ли водоносный горизонт питание инфильтрацией атмосферных осадков или оно отсутствует.

Допустим, что в пределах междуречья происходит питание грунтовых вод инфильтрацией атмосферных осадков (рис. 14). Представим себе, что по оси междуречья параллельно рекам, ограничивающим междуречье, заложена горизонтальная галерея. При равных отметках уровней воды в реках дебит галереи на еди-

ницу ее длины с двух сторон по формуле Г. Н. Каменского (1943) выразится:

$$q = k\frac{h_1^2 - h_0^2}{l} + wl. \qquad \text{(III, 2)}$$

По уравнению Г. Н. Каменского величины w и k связаны следующей зависимостью:

$$w = k\frac{h_e^2 - h_1^2}{l^2}, \qquad \text{(III, 3)}$$

где h_e — превышение уровня грунтовых вод над водоупором в середине междуречья в естественных условиях.

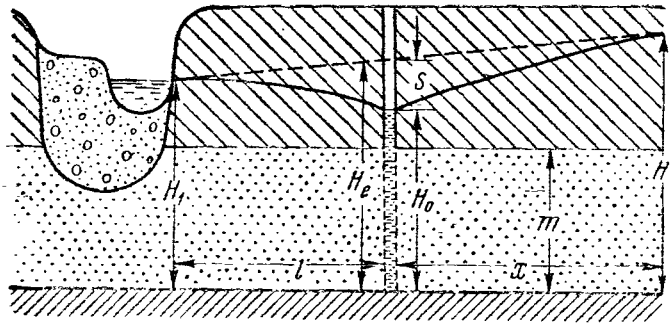


Рис. 15.

Подставив выражение w из (III, 3) в (III, 2), получим:

$$q = k\frac{h_e^2 - h_0^2}{l}. \qquad \text{(III, 4)}$$

Таким образом, величина инфильтрационного питания (w) в формулу (III, 4), по которой производится расчет эксплуатационных запасов, не входит. Это питание «автоматически» учитывается положением естественного уровня грунтовых вод (h_e). Действительно, если бы питание отсутствовало, то в пределах междуречья поверхность грунтовых вод была бы горизонтальной ($h_e = h_1$) и дебит галереи соответственно был бы меньше.

Приведем другой пример. Допустим, что поток подземных вод разгружается рекой (рис. 15). Для упрощения вывода примем, что водоносный горизонт напорный. Параллельно берегу реки на расстоянии l от нее заложена галерея, дебит которой по формуле Дюпюи для напорных вод выражается:

$$q = km\left(\frac{H_1 - H_0}{l} + \frac{H - H_0}{x}\right). \qquad \text{(III, 5)}$$

Выразив H_0 как разность напора H_e в естественных условиях и понижения при откачке S и сделав соответствующую подстановку в формулу (III, 5), получим:

$$q = km\left(\frac{H_1 - H_e + S}{l} + \frac{H - H_e + S}{x}\right).$$

Поскольку

$$\frac{H_e - H_1}{l} = \frac{H - H_e}{x} = i,$$

где i — уклон естественного потока, то выражение расхода можно переписать следующим образом:

$$q = km\left(-i + \frac{S}{l} + i + \frac{S}{x}\right);$$

$$q = kmS\left(\frac{1}{l} + \frac{1}{x}\right). \qquad \text{(III, 6)}$$

Таким образом, величина уклона потока, характеризующего его расход в естественных условиях, сокращается и в выражение расхода галереи не входит, так как она уже учитывается величиной напора подземных вод до эксплуатации (H_e).

Отсутствие явной связи между величиной естественного расхода подземного потока и эксплуатационными запасами подземных вод при расчетах последних методами динамики подземных вод объясняется тем, что положение пьезометрической или свободной поверхности подземных вод в естественных условиях уже выражает величину их питания, при этом совершенно определенно и однозначно. Таким образом, не проводя специально при расчете эксплуатационных запасов определения величин расхода подземного потока в естественных условиях и инфильтрации атмосферных осадков, мы учитываем эти факторы формирования запасов по положению уровня подземных вод в естественных условиях.

Принципиально по-иному следует подходить к оценке роли расхода естественного потока подземных вод в тех случаях, когда водоносный пласт ограничен водоупорными породами (1960).

Рассмотрим, например, следующую схему (рис. 16). Подземные воды приурочены к пескам, где имеется поток грунтовых вод, и к крутопадающему пласту известняков, ограниченному слабопроницаемыми сланцами. При эксплуатации водоносного горизонта в известняках, гидравлически связанного с грунтовыми водами в песках, депрессия может опуститься ниже кровли известняков. В этих условиях поток грунтовых вод перехватывается водозабором и отток их ниже водозабора прекращается. Расход естественного подземного потока в данных условиях увеличивает эксплуатационные запасы, т. е. понижения уровней воды в скважинах будут меньше, чем рассчитанные без учета восполнения запасов водоносного горизонта этим потоком. Таким образом, в рассмотренных условиях, помимо определения начального уров-

ня подземных вод до эксплуатации (H_e), необходимо оценить естественные ресурсы водоносного горизонта, определяя их гидродинамическими (по расходу естественного потока) или балансовыми методами.

В отношении гидродинамических методов иногда высказываются крайние точки зрения. Так, некоторые считают, что природные условия столь сложны, что не поддаются математическому отображению, и поэтому применение гидродинамических методов является абстракцией, уводящей нас от природы. Если встать на эту точку зрения, то пришлось бы отказаться от возможности

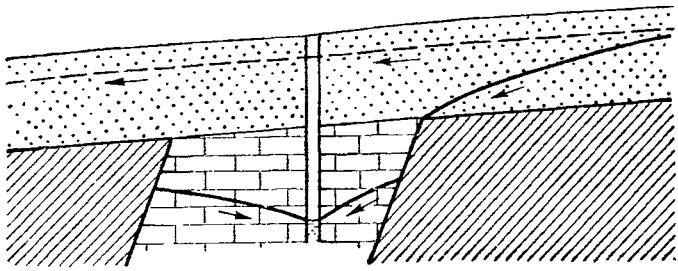


Рис. 16.

прогнозировать изменения уровней воды в скважинах водозабора в процессе эксплуатации, без чего нельзя доказать обеспеченность эксплуатационных запасов во времени. С другой стороны, имеет место и чрезмерная переоценка гидродинамических методов, обусловленная, возможно, подкупающим значением точности применяемого математического аппарата.

Высокую точность и теоретическую обоснованность формул динамики подземных вод нельзя отождествлять с реальной точностью оценки эксплуатационных запасов по этим формулам. При применении теоретических формул природные условия весьма схематизируются и, в частности, принимается постоянство коэффициента фильтрации во всей области фильтрации на площади, измеряемой иногда десятками квадратных километров, упрощаются и реальные формы границ пласта. Контуры пласта в плане принимаются либо прямолинейными, либо круговыми.

Применение гидродинамических методов без сочетания с другими приемами расчета не может обеспечить полную достоверность прогнозов, несмотря на теоретическую обоснованность самих расчетных формул.

Существенное повышение точности оценки эксплуатационных запасов подземных вод гидродинамическими методами может быть достигнуто применением моделирования фильтрации на аналоговых машинах (электроинтеграторы, метод ЭГДА, гидроинтегратор). В этом случае можно учесть изменение водопроводи-

мости пласта дифференцированно по площади, отобразить конфигурацию границ пласта, т. е. более полно и правильно учесть реальные гидрогеологические условия, чем это возможно при расчетах по аналитическим формулам, связанных с значительной «идеализацией» природной обстановки. Моделирование, выполненное на основе данных предварительной разведки, способствует повышению целенаправленности детальной разведки, позволяет выделить наиболее перспективные участки для заложения водозаборов.

Моделирование весьма эффективно также для решения так называемых обратных задач, т. е. определения гидрогеологических параметров пласта (коэффициентов водопроводимости, пьезопроводности, уровнепроводности, перетекания, инфильтрации и испарения), основываясь на данных о положении депрессионной поверхности и ее изменениях во времени.

Применение моделирования целесообразно при сложных гидрогеологических условиях. В простых условиях оценку эксплуатационных запасов можно производить с достаточной для практики точностью по соответствующим формулам гидродинамики.

Гидравлические методы расчета эксплуатационных запасов подземных вод, широко используя эмпирические приемы, основываются непосредственно на данных опыта. Эмпирические формулы, применяемые при гидравлических решениях, должны правильно отражать физический смысл явления и соответствовать теории. Гидравлика рассматривает движение подземных вод осредненно, обобщенно. Так, например, связь между дебитом и понижением уровня воды при откачке из скважины зависит от сопротивлений движению воды в пласте, в призабойной зоне, в фильтре и в трубе скважины. Учесть по соответствующим формулам теоретической гидродинамики влияние каждого из этих факторов принципиально возможно, но полученные результаты могут оказаться далекими от действительности вследствие трудности определения исходных параметров. Гораздо надежнее, как это и делается на практике, определять зависимость понижения от дебита непосредственным опытом — откачкой из скважины при разных дебитах, т. е. воспользоваться гидравлическим методом.

Определяемые при опытных откачках значения эмпирических параметров позволяют прогнозировать понижения уровней применительно к эксплуатационным дебитам.

Гидравлические методы применяются также для расчетов взаимодействующих скважин, при этом наблюдаемые при опытных откачках «срезки» уровней в соседних скважинах являются более надежной основой для прогнозов их величины в условиях эксплуатации, чем расчеты срезок по теоретическим формулам при усредненном значении коэффициента фильтрации для всего участка водозабора и области его влияния, что было в свое время правильно подчеркнуто М. Е. Альтовским (1947). Неоднородность

пласта, всегда наблюдающаяся в природе, оценивается гидравлическими методами результативно, интегрированно.

Гидравлическими методами нельзя установить обеспеченность восполнения эксплуатационных запасов подземных вод, так как экстраполяционные формулы не включают величин, характеризующих баланс потока. Поэтому гидравлическими методами можно оценить эксплуатационные запасы, лишь применяя их совместно с гидродинамическими или балансовыми методами.

Балансовые методы расчета запасов подземных вод основаны на том, что объем воды, извлеченной водозабором за тот или иной срок его эксплуатации, равен сумме объемов воды, полученной за счет: а) отбора воды из естественных запасов; б) частичного перехвата водозабором расхода естественного потока; в) увеличения питания водоносного горизонта, вызванного эксплуатацией.

Какая часть естественных запасов и расхода естественного потока будет использована водозабором, а также несколько увеличится питание водоносного горизонта при его эксплуатации, по балансовому уравнению определить невозможно.

Как отмечалось выше, при решении задачи методами гидродинамики баланс потока учитывается в каждом бесконечно малом элементе потока. Если гидродинамическое уравнение решается в конечных разностях, то эти элементы имеют конечные размеры, но остаются очень малыми по сравнению с размерами участка, на котором рассматривается движение подземных вод. Решая задачу аналитическими методами или численным интегрированием (конечные разности), можно определить понижения уровней в любой точке водоносного пласта (в том числе в скважинах) на любой момент времени.

При применении собственно балансового метода уже нет элементов: баланс участка рассматривается в целом по поступлению и расходованию воды на его границах. Следовательно, балансовый метод позволяет судить лишь о средней для всего балансового района величине изменения уровня подземных вод, а не прогнозировать понижения уровней воды в скважинах водозабора.

Вместе с тем балансовый метод позволяет дать характеристику восполнения запасов за счет естественных ресурсов водоносного горизонта, что особенно важно при оценке эксплуатационных запасов водоносных горизонтов, имеющих небольшую область питания.

Если при оценке эксплуатационных запасов подземных вод на отдельных участках (что и рассматривается в нашей работе) балансовые методы играют подчиненную роль, то при региональной оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод они приобретают существенное значение. В сложившихся условиях расстояния между водозаборами подземных вод, как правило, превышают удвоенные величины практически измеримых радиусов пи-

тания водозаборов, которые поэтому работают не только без взаимодействия, но и характеризуются остающимися между ними большими неиспользуемыми «целиками». Поэтому при оценке эксплуатационных запасов на отдельных участках только в некоторых случаях возникает необходимость сопоставления дебита водозабора с величиной восполняемости запасов.

При непрерывном увеличении потребности в воде в нашей стране уже сейчас со всей остротой возникает необходимость перспективной оценки эксплуатационных ресурсов в региональном плане (для отдельных водоносных горизонтов, отдельных естественноисторических и административно-хозяйственных районов и для страны в целом).

При региональной оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод значение балансовых методов очень велико. Если отбор воды на отдельных участках будет в сумме превосходить эксплуатационные ресурсы подземных вод во всей области распространения водоносного горизонта, то эксплуатационные запасы на отдельных участках окажутся необеспеченными.

При оценке эксплуатационных запасов балансовыми методами нельзя ориентироваться только на использование естественных ресурсов подземных вод.

Действительно, если считать допустимым использование только естественных ресурсов подземных вод, то эта возможность гарантирована на неограниченный срок и при одновременном извлечении части естественных запасов подземных вод, накопленных за геологически долгое время. При сработке запасов их восполняемость не только не уменьшается, но, как правило, усиливается: при понижении уровня подземных вод возникает или увеличивается питание из рек и озер, а также, что особенно важно для районов с аридным климатом (Средняя Азия, Казахстан), уменьшается расходование грунтовых вод на испарение.

Использование естественных запасов подземных вод позволяет во многих районах отказаться на долгие годы от крупных единовременных капиталовложений на строительство гидротехнических сооружений (плотин, каналов) для водоснабжения и орошения.

К использованию естественных запасов подземных вод следует подходить в принципе так же, как к использованию запасов других полезных ископаемых — угля, железа, нефти и др. Увеличение добычи этих ископаемых справедливо рассматривается как достижение народного хозяйства, а сработку естественных запасов подземных вод некоторые специалисты почему-то считают недопустимыми. Между тем положение с запасами подземных вод, несомненно, лучше, чем с запасами других полезных ископаемых. Если через какое-то, весьма отдаленное время запасы нефти или железа будут выработаны, то подземным водам это никогда не угрожает, и человек всегда сможет получить ту воду, которая поступает в водоносный горизонт в области его питания. Обязательным условием при этом является сохранение такой мощности

водоносного горизонта, при которой обеспечивается работа водозаборных скважин.

Мы сочли необходимым остановиться на вопросах использования запасов подземных вод с целью показать, с одной стороны, важность применения при их региональной оценке балансовых методов, с другой — предостеречь от необоснованных спасений эксплуатировать отдельные водозаборы с расходами, сумма которых превосходит величину естественных ресурсов водоносного горизонта. В последнем случае на основе применения гидродинамических методов можно определить, в течение какого времени (исчисляемого обычно десятилетиями и столетиями) водозабор может работать с расходами, значительно превосходящими естественные ресурсы подземных вод.

Все рассмотренные методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод (гидродинамические, гидравлические, балансовые) имеют и достоинства и недостатки, поэтому нельзя ограничиваться применением только одних из них, а следует применять их совместно.

Наиболее эффективно одновременное применение гидравлических и гидродинамических методов. Гидравлическими методами определяются понижения уровней воды в скважинах и в зоне их влияния, которые затем пересчитываются применительно к намеченным эксплуатационным дебитам скважин. С помощью гидродинамических методов эти понижения, соответствующие длительности опытной откачки, могут быть экстраполированы во времени на весь срок эксплуатации водозабора. В данном случае погрешность от усреднения гидрогеологических параметров гораздо меньше, так как в большинство формул, по которым рассчитываются изменения понижений во времени, величина коэффициента фильтрации входит под знаком логарифма, а не в первой степени, как при расчете самих понижений.

При применении гидравлических методов совместно с балансовыми дебит водозабора рассчитывается отдельно от восполнения запасов, и требуется лишь соблюдение равенства (баланса) этих величин в отличие от гидродинамических методов, рассматривающих приток к водозабору, движение воды в пласте, осушение пласта, усиление питания как единый процесс, изменяющийся во времени. Следовательно, совместное использование балансовых и гидравлических методов, вообще говоря, менее эффективно, чем сочетание гидродинамических и гидравлических методов. Однако в тех случаях, когда гидрогеологические параметры пласта недостаточно определенны (например, в карсте), более целесообразно совместное применение гидравлических и балансовых методов.

Наконец, в особо сложных гидрогеологических условиях, при незначительных размерах области питания, резко выраженной неравномерности питания во времени, небольшой величине естественных запасов подземных вод, целесообразно совместное применение всех методов. Примером таких условий могут служить

«сухие» долины Казахстана, имеющие поверхностный сток в короткий период паводка и при этом не каждый год.

Выбор метода оценки эксплуатационных запасов зависит не только от гидрогеологических условий, но и от степени изученности этих условий, определяющей категорию запасов.

Для обоснования запасов по промышленным категориям (А, В) расчеты должны производиться комплексным методом, т. е. с одновременным сочетанием гидравлических методов с гидродинамическими или с балансовыми. Последнее допустимо только в тех случаях, когда защищаемая цифра запасов заведомо меньше естественных ресурсов водоносного горизонта. В особо сложных условиях, как указывалось, необходимо совместное применение всех методов.

Запасы по категории C_1 могут обосновываться применением одного из перечисленных методов на основе данных об удельных дебитах отдельных скважин, гидродинамических расчетов по ориентировочным значениям гидрогеологических параметров, по ориентировочной величине питания водоносного горизонта в естественных условиях и др.

Глава IV

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод гидродинамическими методами сводится к расчету понижений уровней воды в скважинах водозабора при заданном дебите скважин.

Эксплуатационные запасы могут рассчитываться на практически неограниченное время использования или на определенный срок амортизации водозабора. В первом случае расчеты производятся по формулам установившегося, во втором — неустановившегося движения подземных вод.

Все более или менее крупные водозаборы состоят из нескольких скважин, работающих в условиях взаимного влияния. Поэтому оценка эксплуатационных запасов производится с учетом взаимодействия скважин. Расчет взаимодействующих скважин основывается на методе наложения течений (суперпозиции). Сущность этого метода применительно к рассматриваемой задаче заключается в том, что из напоров естественной пьезометрической поверхности подземных вод вычитаются понижения, обусловленные откачкой из скважин, что и определяет напоры в условиях эксплуатации.

В соответствии с теорией Форхгеймера понижение уровня воды в скважине (S) слагается из понижения (S_0) при работе ее как одиночной (т. е. без взаимодействия) и суммы понижений ($\Sigma\Delta S$), вызванных работой других скважин водозабора, оказывающих влияние на данную скважину.

$$S = S_0 + (\Delta S_1 + \Delta S_2 + \ldots + \Delta S_n). \qquad \text{(IV, 1)}$$

Понижения, вызванные откачкой из других скважин, иначе называются срезками уровня. Действительно, сумма этих понижений как бы срезает естественный статический уровень в скважине, находящейся в зоне влияния откачки из других скважин. Поэтому понижение уровня в скважине, работающей в условиях взаимодействия (S), должно быть больше, чем в отдельно работающей скважине (S_0) на величину суммы срезок ($\Sigma\Delta S$).

Формирование депрессионной воронки подземных вод, а следовательно, и методы расчета понижений уровней воды в скважинах зависят от граничных условий водоносного пласта.

НЕОГРАНИЧЕННЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ

Если пласт однороден, то понижение напора подземных вод в неограниченном пласте распространяется с равной скоростью по всем направлениям от скважины, из которой производится откачка. На каждый данный момент изолинии понижений имеют вид концентрических окружностей, центром которых является скважина. Это положение справедливо не только для бассейна подземных вод, но и для потока подземных вод. Асимметричность депрессионной воронки в потоке подземных вод обусловлена только тем, что начальные напоры, от которых отсчитываются понижения, различны.

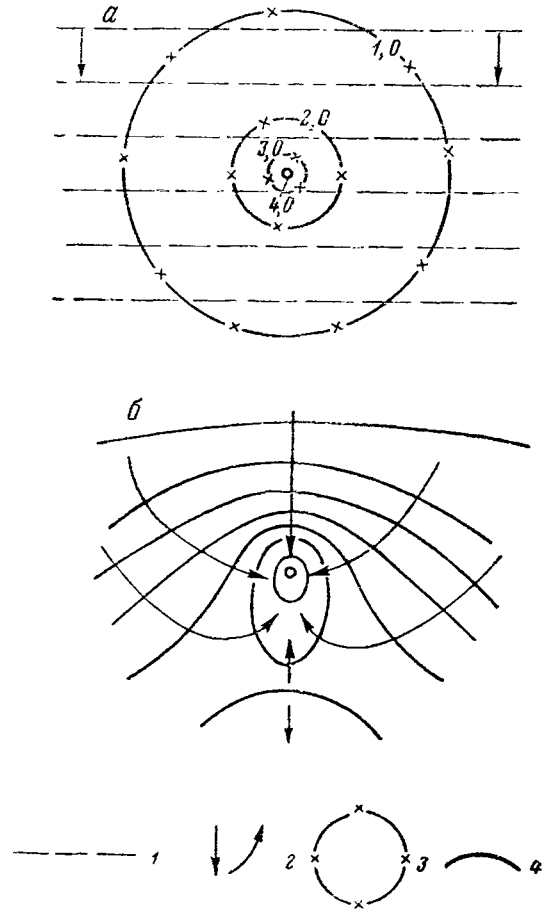


Рис. 17. Схема наложения течений при откачке из скважины

а — поток подземных вод в естественных условиях, *б* — поток подземных вод, возмущенный откачкой. *1* — гидроизопьезы в естественных условиях; *2* — направление потока подземных вод; *3* — линии равных понижений уровней воды при откачке; *4* — гидроизопьезы в процессе откачки

Допустим, что до откачки гидроизопьезы располагались так, как это показано на рис. 17. На некоторый момент времени после начала откачки произошло понижение напора, которое, как указывалось, не зависит от направления и уклона естественного потока (см. рис. 17, *а*). Если карту гидроизопьез совместить с картой изолиний понижений, то, вычитая из отметок напоров в естественных условиях величины понижений при откачке, получим ряд точек, по которым можно построить гидроизопьезы в условиях откачки (см. рис. 17, *б*). Таким образом, асимметрия депрессионной воронки является следствием сложения двух течений — естественного потока и понижений при откачке, которые не зависят от естественного потока и определяются так же, как для бассейна подземных вод. Независимость понижений напоров от направления, уклона и расхода естественного потока позволяет применять все формулы, выражающие дебит скважин, в равной

мере как в бассейне, так и в потоке подземных вод, что было доказано в прошлом столетии Н. Е. Жуковским (1948).

Депрессионная воронка непрерывно увеличивается во времени, так как уклоны потока, вызванного откачкой, всегда больше уклона естественного потока. Рассмотрим два случая — откачку из скважин, происходящую при постоянном понижении уровня воды в них, и откачку с постоянным расходом.

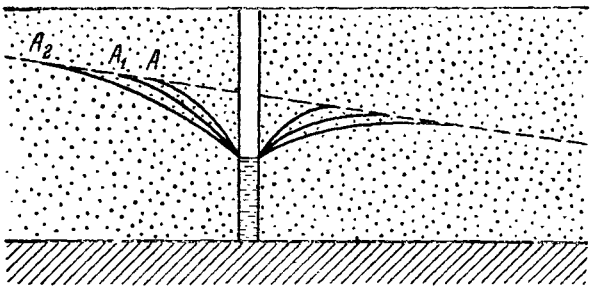


Рис. 18.

Допустим, депрессия, вызванная откачкой, производящейся с постоянным понижением, через некоторое время распространилась до точки A (рис. 18). Уклон естественного потока меньше уклона, образующегося внутри воронки депрессии, поэтому приток воды из области питания к точке A всегда меньше, чем отток от нее в направлении к скважине. Поэтому развитие депрессии не может ограничиться точкой A; в процессе откачки граница депрессии должна последовательно распространяться до точек A_1 и A_2 и т. д. Рост радиуса влияния уменьшает уклон потока внутри воронки, поэтому дебит скважины непрерывно уменьшается во времени.

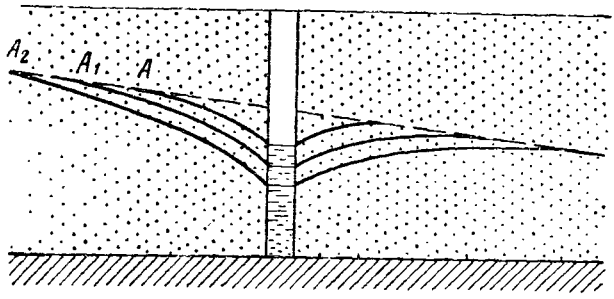


Рис. 19.

Пусть откачка производится с постоянным дебитом, причем депрессия распространилась до точки A (рис. 19). Перемещение ее к точке A_1 обязательно вызовет дополнительное понижение уровня воды в скважине, так как в противном случае дебит скважины должен был бы уменьшиться вследствие уменьшения градиента, что не соответствовало бы условию постоянства дебита.

Рассмотрим особенности формирования депрессионной воронки в безнапорных и напорных водах.

Если водоносный пласт имеет свободную поверхность, то развитие депрессионной воронки обязательно сопровождается осушением водоносного пласта.

Чем больше водопроводимость пласта, выражающаяся произведением коэффициента фильтрации горных пород и мощности пласта, тем быстрее распространяется влияние откачки. Наоборот, чем больше водоотдача пород, тем депрессия развивается медлен-

нее, так как при том же объеме откачанной воды объем осушенного пласта меньше. Эти закономерности, непосредственно вытекающие из дифференциального уравнения неустановившегося движения подземных вод, давно подмечены на практике. Так, например, известно, что радиусы влияния при откачках из водоносных пластов, сложенных крупнозернистыми песками, больше, чем из пластов мелкозернистых песков. В скальных породах, проницаемых по трещинам, общий объем которых очень мал по сравнению с объемом пласта, депрессия растет значительно быстрее, чем при откачках из водоносных песков, галечников и других рыхлых пород, проницаемых по порам и обладающих большой водоотдачей.

Способность пласта передавать изменения уровня подземных вод со свободной поверхностью выражается так называемым коэффициентом уровнепроводности (a_y), величина которого пропорциональна водопроводимости пласта и обратно пропорциональна водоотдаче пород:

$$a_y = \frac{kh_{ср}}{\mu}. \qquad \text{(IV, 2)}$$

Этот параметр входит во все уравнения неустановившегося движения подземных вод со свободной поверхностью.

Если выразить k в *м/сутки*, $h_{ср}$ в метрах, то размерность коэффициента уровнепроводности *м²/сутки* (μ — величина безразмерная).

Значения коэффициентов уровнепроводности водоносных горизонтов, используемых для водоснабжения, обычно выражаются порядком нескольких тысяч квадратных метров в сутки. Так, например, если грунтовые воды приурочены к аллювиальным пескам, имеющим коэффициент фильтрации 10 *м/сутки* и коэффициент водоотдачи 0,20, то при мощности водоносного пласта 30,0 *м* коэффициент уровнепроводности составит $\frac{10 \cdot 30}{0{,}20} = 1500$ *м²/сутки*.

Чем больше воды поступает в скважину за счет осушения пласта, т. е. чем больше используются естественные запасы подземных вод, тем медленнее увеличивается радиус влияния откачки во времени. При откачке из напорных вод осушения пласта не происходит, и скорость развития депрессии регулируется иными процессами.

Если бы вода и порода водоносного пласта были бы абсолютно несжимаемыми, а кровля и подошва напорного водоносного горизонта абсолютно непроницаемыми, то всякое изменение напора, вызванное откачкой, распространялось бы по водоносному пласту, как в твердом теле, т. е. со скоростью звука (практически мгновенно). При этом понижение напора подземных вод в зоне влияния откачки оказалось бы практически равным понижению напора в скважине, из которой производится откачка, т. е. градиенты потока, питающего скважину, были бы равны нулю и скважина

через короткое время перестала бы давать воду. На самом деле, хорошо известно, что при откачке из напорных вод депрессионная кривая, хотя и развивается гораздо быстрее, чем при откачке из безнапорных вод, подобных явлений никогда не наблюдается.

Представим себе нить большой длины из материала, не способного растягиваться при натяжении. Если потянуть за один конец нити, то ее другой конец практически мгновенно передвинется на ту же величину. Если нить сделана из упругого материала (например, из резины), то при приложении усилия она будет растягиваться, другой конец начнет передвигаться с некоторым запозданием, тем большим, чем больше упругость нити.

Аналогичное явление происходит и при откачке из скважин. Вода при понижении давления в пласте, вызванном откачкой, разуплотняется, вместе с тем понижение давления вызывает упругое расширение пород, под влиянием чего вода как бы выдавливается из пласта в скважину. Таким образом, возникает своеобразный «упругий» режим подземных вод, теорию которого наиболее полно и всесторонне разработал В. Н. Щелкачев (1948).

Упругие свойства воды и горных пород, определяющие неустановившееся движение подземных вод в напорных условиях, учитываются коэффициентом пьезопроводности, т. е. коэффициентом скорости распространения давления, который связан с характеристиками упругих свойств воды и горной породы, водоносного пласта следующей зависимостью:

$$a = \frac{k}{P\beta_B + \beta_c}, \qquad \text{(IV, 3)}$$

где a — коэффициент пьезопроводности;
P — пористость пласта (для трещиноватых пород — отношение объема трещин к объему породы);
β_B — коэффициент объемной упругости воды;
β_c — коэффициент объемной упругости горных пород, слагающих водоносный пласт.

Коэффициент β_B характеризует способность воды изменять объем при изменении давления. По данным В. Н. Щелкачева,

$$\beta_B = \frac{2{,}7 \div 5}{1\,000\,000} \cdot \frac{1}{м},$$

т. е. при понижении давления на 1 *м* объем воды увеличивается в пределах от 2,7 до 5 миллионных долей своего первоначального объема.

Значения коэффициента упругости горных пород, при отнесении его к 1 *м* изменения давления, по В. Н. Щелкачеву, имеют следующий порядок величины:

$$\beta_c = \frac{0{,}3 \div 2}{1\,000\,000} \cdot \frac{1}{м}.$$

Коэффициенты β_B и β_c имеют разность $1/м$, коэффициент фильтрации — *м/сутки*, а пористость — величина безразмерная, поэтому размерность коэффициента пьезопроводности, как это ясно из формулы (IV, 3), — $м^2$/*сутки*, т. е. та же, что и коэффициента уровнепроводности.

Сопоставим значения коэффициентов пьезопроводности и уровнепроводности, задавшись, например, следующими данными: коэффициент фильтрации пласта 10 *м/сутки*, его мощность 50 *м*, пористость 0,40, водоотдача 0,25. Зададимся наибольшими значениями коэффициентов упругости:

$$\beta_B = 5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{M}; \quad \beta_c = 2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{м}.$$

Тогда по формуле (IV, 3) коэффициент пьезопроводности выразится:

$$a = \frac{10}{0{,}40 \cdot 5 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6}} = 2\,500\,000 \ м^2/сутки,$$

а коэффициент уровнепроводности по формуле (IV, 2).

$$a_y = \frac{10 \cdot 50}{0{,}25} = 2000 \ м^2/сутки.$$

Таким образом, коэффициент пьезопроводности превосходит коэффициент уровнепроводности во много раз, чем и объясняется значительно большая скорость развития депрессионных воронок в напорных водах по сравнению с безнапорными. Значения коэффициентов пьезопроводности, характерные для водоносных горизонтов, используемых для водоснабжения, обычно лежат в пределах $10^5 \div 10^7$ $м^2$/*сутки*, коэффициентов уровнепроводности $10^3 \div 10^4$ $м^2$/*сутки*.

Зависимость понижения уровня воды в любой точке, находящейся в сфере влияния откачки из скважины, в условиях напорных вод выражается следующей формулой;

$$S = \frac{Q}{4\pi km}\left[-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)\right], \qquad \text{(IV, 4)}$$

где S — понижение напора в расстоянии r от оси скважины, из которой производится откачка, через время t от начала откачки;

E_i — обозначение интегральной показательной функции.

Значения функции E_i, имеющей отрицательный знак, приведены в приложении. Эта функция является обратной по отношению к логарифмической и убывает с увеличением значения аргумента $\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$, как это видно из табл. 2.

При малом значении аргумента функция E_i может быть заменена логарифмической:

$$-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right) = \ln\frac{2{,}25}{r^2}at. \qquad \text{(IV, 5)}$$

Таблица 2

$-\frac{r^2}{4at}$	$-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$
0	∞
0,01	4,038
0,1	1,823
1	0,219
10	0,000004
∞	0

В этом случае формула (IV, 4) приобретает вид:

$$S=\frac{Q}{4\pi km}\ln\frac{2{,}25at}{r^2}. \qquad \text{(IV, 6)}$$

Погрешность определения понижения в скважине при такой замене при $\frac{r^2}{4at}\leqslant 0{,}1$ составляет 5,7%, а при $\frac{r^2}{4at}\leqslant 0{,}01$ не превосходит 0,25% (рис. 20).

Для самой скважины, из которой производится откачка, $r=r_0$, где r_0 — радиус водоприемной части (фильтра) скважины. Величина $\frac{r_0^2}{4at}$ чрезвычайно мала и уже через несколько минут откачки выражается миллионными долями единицы, поэтому здесь уже с самого начала откачки действует логарифмический закон понижения уровня, выражаемый формулой (IV, 6).

Вблизи скважины уже с самого начала откачки образуется область, непрерывно расширяющаяся во времени, где кривая депрессии имеет тот же вид, что при установившемся движении (логарифмическая кривая). Но и в этой зоне фильтрация не является установившейся, так как депрессионная кривая перемещается во времени параллельно самой себе по мере понижения динамического уровня воды в скважине. Этот вид движения называется квазистационарным.

При длительной эксплуатации условие $\frac{r^2}{4at}<0{,}1$ соблюдается на расстояниях, заведомо превышающих длину участка водозабора, т. е. движение для всей области водозабора носит квазистационарный характер и кривые депрессии, определяющие срезки уровней воды при взаимодействии скважин, близки к логарифмическим.

В табл. 3 приведены значения расстояний r в километрах, в пределах которых это условие соблюдается. Время от начала эксплуатации водозабора принято 10 000 суток (27—28 лет).

Таблица 3 показывает, что в условиях напорных вод во всех случаях формула (IV, 6) оказывается применимой, так как расстояния между крайними скважинами водозабора никогда не вы-

ражаются десятками километров. Она применима также и для безнапорных вод, особенно учитывая, что на расстоянии нескольких километров абсолютная величина понижения уровня очень мала. Так, например, если расстояние от скважины (r) даже вдвое превосходит величину, приведенную в табл. 3, то ошибка при применении формулы (IV, 6) не существенна.

Таблица 3

Тип водоносного горизонта	Характерные значения коэффициентов, $м^2/сутки$		r, $км$
	уровнепроводности $a_у$	пьезопроводности a	
Безнапорные воды	1 000	—	$\leqslant 2{,}0$
	10 000	—	$\leqslant 6{,}3$
Напорные воды	—	100 000	$\leqslant 20$
	—	1 000 000	$\leqslant 63$
	—	10 000 000	$\leqslant 200$

Рассмотрим наиболее «невыгодный» случай, приняв малое значение коэффициента уровнепроводности $a_у = 1000$ $м^2/сутки$ и большое расстояние $r = 4000$ $м$. По формулам (IV, 4) и (IV, 6) вычислим понижение в этой удаленной точке относительно понижения S_0 в скважине, из которой производится откачка. Радиус скважины r_0 примем равным 0,1 $м$, время эксплуатации 10 000 суток.

Понижение в скважине выразим по формуле (IV, 6), подставив $r = r_0$.

По точной формуле (IV, 4):

$$\frac{S}{S_0} = \frac{-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)}{\ln\frac{2{,}25at}{r_0^2}} = 0{,}0326;$$

по приближенной формуле (IV, 6):

$$\frac{S}{S_0} = \frac{\ln\frac{2{,}25at}{r^2}}{\ln\frac{2{,}25at}{r_0^2}} = 0{,}0149.$$

Относительная погрешность при расчетах по приближенной формуле (IV, 6) значительная ($\frac{0{,}0326}{0{,}0149} = 2{,}1$), но абсолютная невелика. Так, при понижении в центральной скважине 10 $м$, абсолютная величина ошибки составит $10(0{,}0326 - 0{,}0149) = 0{,}177$ $м$. Такая погрешность при оценке эксплуатационных запасов не имеет практического значения и, следовательно, формулой (IV, 6)

можно пользоваться для расчетов понижений уровня на длительный период эксплуатации водозабора в условиях пласта «неограниченных размеров» во всех случаях.

Понижение уровня воды (S) по формуле (IV, 6) равно нулю в том случае, если $\frac{2{,}25at}{r^2} = 1$, т. е. логарифм этой величины ра-

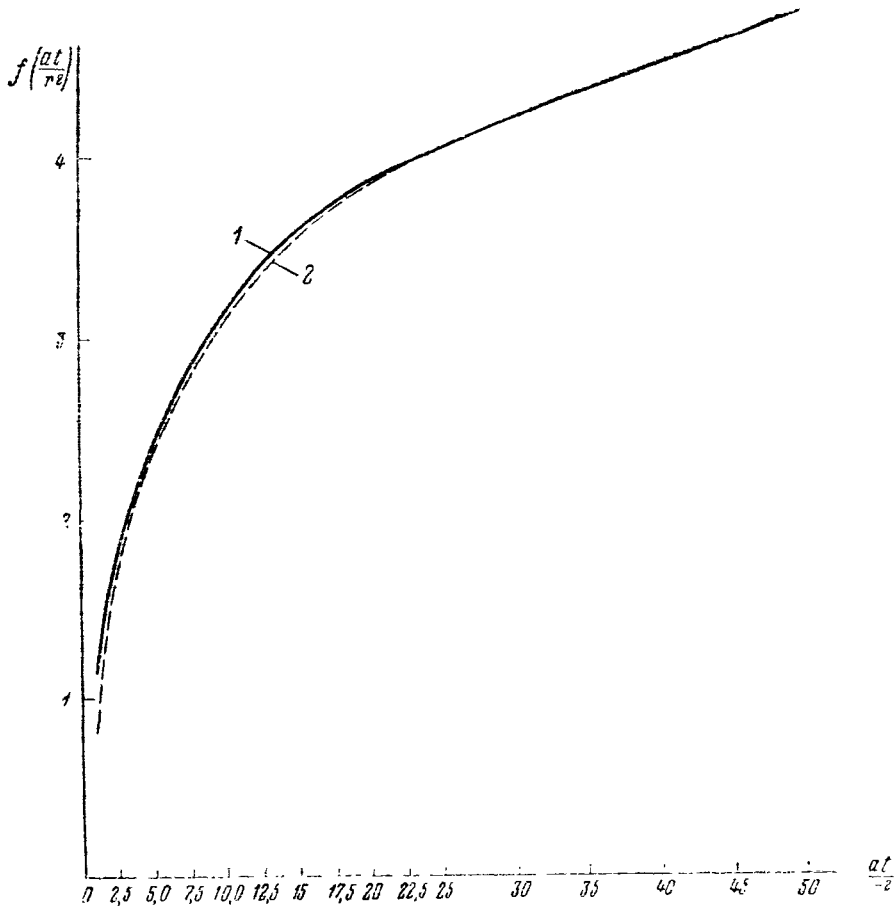


Рис. 20. График функции E_i и логарифмической функции

1 — кривая, рассчитанная по логарифмической зависимости; *2* — кривая, рассчитанная по экспоненциальной зависимости

вен нулю. Обозначив расстояние, на котором это условие соблюдается, $r = R_п$, получим:

$$R_п^2 = 2{,}25at; \quad R_п = 1{,}5\sqrt{at}. \qquad \text{(IV, 7)}$$

Если воды безнапорные, то в формулу (IV, 7) вместо величины коэффициента пьезопроводности (a) следует подставить величину коэффициента уровнепроводности ($a_у$).

Величина $R_п$ названа В. Н. Щелкачевым (1959) приведенным радиусом влияния скважины. Подставив выражение $R_п^2$ в формулу (IV, 6), получим:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \cdot \ln \frac{R_п^2}{r^2} = \frac{Q}{2\pi km} \cdot \ln \frac{R_п}{r}, \qquad (IV, 8)$$

т. е. известную формулу Дюпюи.

Понижение уровня воды в скважине определяется из формулы (IV, 8) при подстановке в нее

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi km} \cdot \ln \frac{R_п}{r_0}. \qquad (IV, 9)$$

Введение в формулу неустановившегося движения величины приведенного радиуса влияния является удобным расчетным приемом для оценки эксплуатационных запасов, позволяющим производить расчеты неустановившегося движения при длительной эксплуатации водозабора по формулам установившейся фильтрации, выражая в них радиус влияния в функции времени.

Значения приведенных радиусов влияния ($R_п$), вычисленные по формуле (IV, 7), соответствующие сроку эксплуатации 10 000 суток, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Тип водоносного горизонта	Характерные значения коэффициентов, $м^2/сутки$		Приведенный радиус $R_п$, $км$
	уровнепроводности, $a_у$	пьезопроводности, a	
Безнапорные воды	1 000	—	4,7
	10 000	—	15,0
Напорные воды	—	100 000	47,0
	—	1 000 000	150,0
	—	10 000 000	474,0

Таким образом, по теории упругого режима следует, что в условиях неограниченного водоносного пласта:

1) понижение уровня в скважинах неограниченно увеличивается во времени; при $t \to \infty$ по формуле (IV, 6) понижение S_0 также стремится к бесконечности, т. е. через некоторое время уровень воды в скважине снизится до подошвы водоносного пласта, после чего дебит скважины будет уменьшаться;

2) радиус влияния непрерывно увеличивается, и депрессия распространяется до границ водоносного пласта независимо от расстояния, на котором они находятся от пункта откачки.

Однако практика эксплуатации водозаборов показывает, что во многих случаях, если в работу не вводятся новые скважины,

уровни воды в скважинах водозабора через некоторое время, по существу, стабилизируются. Практически наблюдаемые радиусы влияния даже очень крупных водозаборов артезианских вод, эксплуатируемых десятилетиями, обычно не превышают 25—30 *км*, т. е. в несколько раз меньше значений приведенных радиусов, рассчитанных по параметрам упругого режима (см. табл. 4).

Таким образом, имеет место определенное несоответствие теории упругости режима с данными практики. Следует заметить, что это несоответствие отнюдь не обусловливается какими-либо погрешностями самой теории. Оно связано с тем, что предпосылки, положенные в основу вывода формулы (IV, 4), в некоторых случаях не отражают действительных природных условий.

При выводе формулы (IV, 4) допущено, что пласты, залегающие непосредственно в кровле и в подошве артезианского горизонта, являются абсолютно непроницаемыми. Такая предпосылка может быть принята для сильно уплотненных и находящихся под большим давлением глинистых слоев, залегающих на больших глубинах. Артезианские воды, используемые для водоснабжения, залегают на значительно меньших глубинах и разделяющие их слои во многих случаях нельзя рассматривать как «абсолютные» водоупоры.

Совершенно с других позиций к вопросу формирования депрессионных воронок в напорных водах подошел А. Н. Мятиев (1947). Он показал, что откачка воды может вызвать перетекание воды из водоносных горизонтов, залегающих выше и ниже эксплуатируемого водоносного горизонта. Слои, разделяющие эти водоносные горизонты, нельзя рассматривать как абсолютные водоупоры. Даже при весьма малых значениях коэффициентов фильтрации разделяющих слоев, благодаря разности напоров, образовавшейся при откачке на большой площади депрессионной воронки, фильтрация через разделяющие слои может полностью обеспечить дебит скважины.

А. Н. Митяев показал, что областями питания напорных водоносных горизонтов являются не только краевые зоны, где этот горизонт получает питание инфильтрацией атмосферных осадков через зону аэрации или из рек, а вся площадь распространения водоносного горизонта, в пределах которой его напор меньше, чем в вышележащих или нижележащих водоносных горизонтах. Точно также областью разгрузки является не только зона дренирования подземных вод в реки и озера, а вся территория, где напор в рассматриваемом горизонте больше, чем в смежных с ним горизонтах.

При разработке своей теории Мятиев принял за основу гипотезу, высказанную Н. К. Гиринским (1938). По этой гипотезе при значительных различиях коэффициентов фильтрации слоев (в сотни и более раз) и понижении напора в слое, имеющем значительную водопроводимость, движение воды в разделяющих слабопроницаемых слоях происходит в вертикальном направлении, а в сильнопроницаемом слое — в горизонтальном (рис. 21).

На основании теории Мятиева — Гиринского и теории упругого режима для одиночной скважины, Хантушем (1956 г.) и для линейного ряда скважин Ф. М. Бочевером (1960) было получено решение задачи неустановившегося притока воды к скважине в условиях перетекания, которое отчетливо выявляет относительную роль перетекания и упругого режима как факторов, формирующих депрессионную воронку.

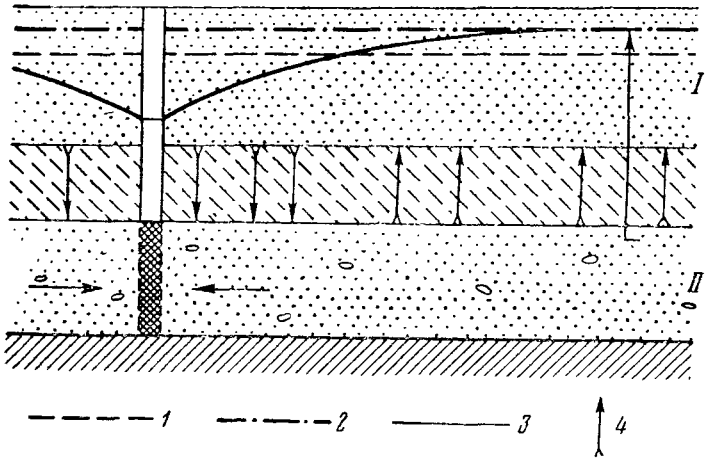


Рис. 21. Схема движения подземных вод в условиях перетекания

1 — уровень грунтовых вод; *2* — пьезометрический уровень напорного горизонта до эксплуатации; *3* — пьезометрический уровень напорного горизонта в процессе эксплуатации; *4* — линии потоков подземных вод через слабопроницаемый слой при откачке

Понижение напора в одиночной скважине, из которой производится откачка, через время t от начала откачки составляет:

$$S = \frac{Q}{4\pi km}\left[2\ln\frac{1{,}12B}{r_0} + E_i\left(-\frac{at}{B^2}\right)\right], \qquad \text{(IV, 10)}$$

где B — коэффициент, зависящий от водопроницаемости и мощности пластов.

При выводе этой формулы сделано допущение, что напоры в пластах, из которых вода перетекает в данный (эксплуатируемый) водоносный горизонт, постоянны. Надо заметить, что эта предпосылка соблюдается лишь в тех случаях, если перетекание компенсируется увеличением питания смежных водоносных горизонтов (например, возникновением фильтрации из рек и т. п.). В иных случаях перетекание со временем уменьшается.

Если перетекание воды происходит через слои, залегающие выше и ниже того слоя, из которого производится откачка, то

$$B = \sqrt{\frac{km}{\frac{k_1}{m_1} + \frac{k_2}{m_2}}}, \qquad \text{(IV, 11)}$$

где k — коэффициент фильтрации слоя, из которого производится откачка мощностью m (рис. 22);

k_1 и k_2 — коэффициенты фильтрации слабопроницаемых слоев, лежащих в кровле и в подошве;

m_1, m_2 — соответственно мощности этих слоев.

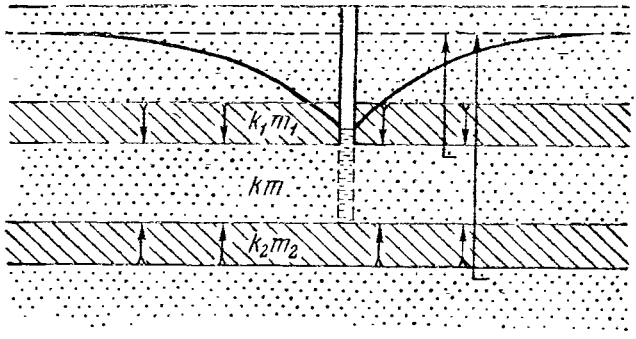


Рис. 22.

В частном случае, если перетекание происходит только через кровлю или подошву водоносного горизонта, т. е. если $k_2=0$ (рис. 23)

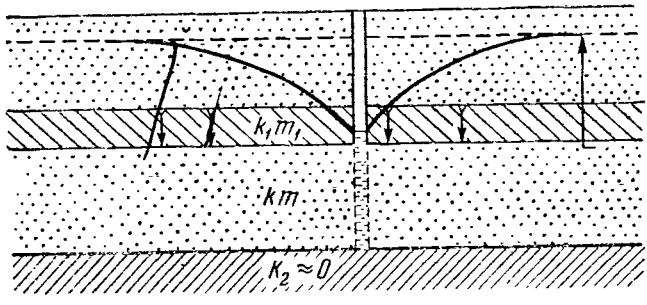


Рис. 23.

$$B = \sqrt{\frac{kmm_1}{k_1}}. \qquad \text{(IV, 12)}$$

Первый член в квадратной скобке формулы (IV, 10) не зависит от времени, второй изменяется во времени. Поскольку с ростом времени t значение функции E_i убывает и через весьма короткое время становится близким к нулю, то понижение напора

в скважине (S_0) с течением времени стремится к стабилизации и имеет следующее предельное значение:

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi km} \cdot \ln \frac{1{,}12B}{r_0}. \qquad \text{(IV, 13)}$$

Сопоставим развитие понижения уровня воды в скважине, работающей в условиях упругого режима и в условиях перетекания. В первом случае понижение уровня воды должно неограниченно возрастать во времени, т. е. наступает момент, когда уровень воды понизится до подошвы водоносного пласта и дальнейшая эксплуатация скважины приведет к уменьшению ее дебита. Это непосредственно следует из формулы (IV, 4), в которой с возрастанием t значение функции E_i стремится к ∞ (значение самой функции E_i отрицательное, поэтому выражение в квадратных скобках положительное). В противоположность этому понижение при откачке в условиях перетекания стремится с течением времени к определенному пределу, величина которого зависит от первого слагаемого квадратной скобки в формуле (IV, 10).

Стабилизация понижения уровня воды в скважине наступает очень быстро, что можно показать следующим расчетом. Допустим, что водоносный пласт известняков, из которого производится откачка, обладает мощностью $m=25$ *м* и характеризуется коэффициентом фильтрации $k=10$ *м/сутки*. Выше и ниже его лежат пласты глин, имеющих коэффициенты фильтрации $k=k_2=0{,}0001$ *м/сутки* и мощность $m_1=m_2=5$ *м*. Коэффициент пьезопроводности водоносного пласта $a=10^6$ *м²/сутки*, радиус скважины $r_0=0{,}1$ *м*. Время от начала откачки 30 суток.

Определим по формуле (IV, 11) значение коэффициента B:

$$B = \sqrt{\frac{10 \cdot 25}{\frac{0{,}0001}{5} + \frac{0{,}0001}{5}}} = 2500 \text{ м}.$$

Вычислим значения первого слагаемого в квадратной скобке формулы (IV, 10), определяющего понижение уровня при установившемся движении:

$$2\ln \frac{1{,}12 \cdot 2500}{0{,}1} = 20{,}4.$$

Второе слагаемое, зависящее от времени, равно:

$$E_i\left(-\frac{10^6 \cdot 30}{5000^2}\right) = E_i(-1{,}2) = -0{,}158.$$

Следовательно, если понижение в рассматриваемом примере определять с учетом неустановившегося движения, то выражение в квадратной скобке равно 20,4—0,158=20,242 и будет отличаться от рассчитанного по установившемуся движению (IV, 13) только на 0,8%, что не имеет, конечно, никакого практического значения.

В зоне влияния откачки стабилизация происходит, естествен-

но, немного медленнее, но и здесь уже в течение первых месяцев эксплуатации движение становится практически установившимся.

Понижение уровня воды в точке, находящейся на расстоянии r от скважины, выражается уравнением (IV, 14), приведенным в работе Ф. М. Бочевера и Н. Н. Веригина (1961):

$$S=\frac{Q}{4\pi km}\left\{2K_0\left(\frac{r}{B}\right)-I_0\left(\frac{r}{B}\right)\cdot\left[-E_i\left(-\frac{at}{B^2}\right)\right]\right\}, \quad \text{(IV, 14)}$$

где $I_0(\frac{r}{B})$ и $K_0(\frac{r}{B})$ — функции Бесселя соответственно первого и второго рода от мнимого аргумента нулевого порядка.

Первый член фигурной скобки определяет понижение в условиях установившегося движения, второй — является поправкой на время, протекшее от момента ввода скважины в работу, при этом с возрастанием времени t он быстро стремится к нулю.

Вычислим значения первого и второго членов выражения в фигурной скобке формулы (IV, 14) при следующих данных: расстояние до точки, в которой определяется понижение, $r=2500$ *м*, время от момента пуска скважины $t=100$ суток, коэффициент $B=5000$ *м*, коэффициент пьезопроводности $a=10^6$ *м²/сутки*. Все эти параметры являются достаточно типичными.

Расчеты дают значение первого члена, равное 1,849, и второго — 0,00467. Таким образом, понижение, определенное с учетом неустановившегося движения, отличается от рассчитанного по установившемуся движению менее чем на 0,3%, что не имеет практического значения.

После приравнивания к нулю второго члена формула (IV, 14) приобретает вид:

$$S=\frac{Q}{2\pi km}\cdot K_0\left(\frac{r}{B}\right). \quad \text{(IV, 15)}$$

Обратимся к формуле (IV, 13), определяющей понижение уровня в скважине, из которой производится откачка. Величина 1,12 B является некоторым приведенным радиусом питания ($R_п$) в известной формуле Дюпюи.

$$R_п=1{,}12B. \quad \text{(IV, 16)}$$

Подстановка значения $R_п$ в формулу Дюпюи позволяет определить понижение уровня воды в скважине в условиях перетекания, хотя депрессия распространяется и далее окружности, имеющей радиус $R_п$. Покажем, что, несмотря на это, вместо формулы (IV, 15) можно пользоваться формулой, аналогичной формуле Дюпюи и для расчета понижений в зоне развития депрессии.

$$S=\frac{Q}{2\pi km}\cdot\ln\frac{R_п}{r}, \quad \text{(IV, 17)}$$

где $R_п=1{,}12\ B$.

Понижения уровня воды в области влияния откачки по отношению к понижению уровня воды в скважине составляют: по строгой зависимости — из формул (IV, 15) и (IV, 13)

$$\frac{S}{S_0} = \frac{K_0\left(\frac{r}{B}\right)}{\ln\frac{R_п}{r_0}};$$

по приближенной зависимости — из формул (IV, 17) и (IV, 13)

$$\frac{S}{S_0} = \frac{\ln\frac{R_п}{r}}{\ln\frac{R_п}{r_0}}.$$

Сопоставим величины отношений $\frac{S}{S_0}$ для широкого диапазона значений B (от 1000 до 10 000 *м*), приняв радиус скважины $r_0 = 0{,}1$ *м*. Результаты сопоставления для различных расстояний (r) наблюдательных скважин от скважины, из которой производится откачка, приведены в табл. 5.

Таблица 5

$\frac{r}{B}$	Отношение $\frac{S}{S_0}$ (%) при B = 1000 *м* и $R_п$ = 1120 *м*			Отношение $\frac{S}{S_0}$ (%) при B = 10 000 *м* $R_п$ = 11 200 *м*		
	по строгой зависимости	по приближенной зависимости	разность	по строгой зависимости	по приближенной зависимости	разность
0,1	26,0	25,7	0,3	20,9	20,7	0,2
0,2	18,8	18,4	0,4	15,1	14,8	0,3
0,5	10,00	8,7	1,3	8,0	7,0	1,0
1,0	4,5	1,2	3,3	3,6	0,9	2,7
1,12	3,8	0	3,8	3,0	0	3,0
2,0	1,2	0	1,2	0,9	0	0,9
3,0	0,4	0	0,4	0,3	0	0,3

На расстояниях $r > R_п$ формула (IV, 17) не применяется, так как принимается, что при $r = 1{,}12B$ понижение равно нулю. Следовательно, величина ошибки за пределами окружности, описанной этим радиусом, уменьшается с увеличением расстояния от скважины и максимальное расхождение между расчетами по приближенной и точной формулам, как показывает табл. 5, не превосходит 3—4% от величины понижения в скважине, из которой производится откачка. Такая погрешность не имеет практического значения и, несомненно, меньше, чем возможная ошибка, связанная с допущением неизменности коэффициента фильтрации

во всей ее области на площади нескольких квадратных километров.

Итак, в неограниченном пласте на конец эксплуатационного периода (обычно расчет производится на срок амортизации водозабора — 25—30 лет) независимо от факторов, влияющих на формирование депрессионной воронки (упругий режим, перетекание), кривые депрессии близки к логарифмическим. Поэтому понижение уровня воды в скважине может рассчитываться по формуле Дюпюи, считая в ней за радиус (R) приведенный радиус влияния ($R_п$).

Обе теории формирования депрессионной воронки исходят из достаточно условных предпосылок. При расчетах на основе теории упругого режима принимается абсолютная непроницаемость кровли и подошвы водоносного пласта на расстояниях, измеряемых десятками и сотнями километров от водозабора. При расчетах, базирующихся на теории перетекания, пренебрегается уменьшением напоров водоносных горизонтов, расположенных выше и ниже эксплуатируемого горизонта, вследствие чего эффект последнего во времени уменьшается. Между тем при длительной эксплуатации может произойти даже полное осушение вышерасположенных горизонтов, фильтрация из которых первое время обеспечивала дебит водозабора. Наконец, в формулах теории перетекания не учитывается, что фильтрация в разделяющих глинистых слоях начинается только в том случае, если напорный градиент достигает определенной величины, называемой начальным градиентом. При меньших градиентах фильтрация не происходит, хотя коэффициент фильтрации породы и не равен нулю.

Формулы упругого режима в силу предпосылок, положенных в основу их вывода, дают значения приведенного радиуса питания с заведомым преувеличением. Поэтому при расчетах эксплуатационных запасов по этим формулам возможная ошибка приводит не к завышению, а к занижению запасов. Учитывая невысокую точность определения гидрогеологических параметров и схематизацию граничных условий, допущение некоторого «запаса» в расчетах является, безусловно, оправданным.

Поскольку депрессия подземных вод формируется под влиянием многих факторов (упругие свойства воды и горных пород, перетекание, связь через «окна» с другими водоносными горизонтами) коэффициент a, определяемый при опытных откачках и особенно по данным эксплуатации, комплексно отражает совокупность влияния этих факторов. Поэтому на практике он не является коэффициентом, характеризующим только упругие свойства воды и пород, а некоторым гидравлическим параметром, связывающим изменение напора воды в скважинах со временем и устанавливаемым опытом.

Как указывалось, общее понижение уровня воды в скважине (S) слагается из понижения при работе ее как одиночной (S_0) и суммы срезок ($\Sigma\Delta S$), вызываемых эксплуатацией других сква-

жин водозабора. Понижение при одиночной работе скважины определяется по формуле (IV, 9), срезка от каждой скважины — по формуле (IV, 8). Если водозабор состоит из нескольких скважин, то формулу (IV, 8) целесообразно записать следующим образом:

$$\Delta S_i = \frac{Q_i}{2\pi k_i m_i} \cdot \ln \frac{R_п}{r_i}, \qquad \text{(IV, 18)}$$

где Q_i — дебит скважины с номером i, вызывающий срезку ΔS_i;

$k_i m_i$ — соответственно коэффициент фильтрации и мощность водоносного пласта в скважине, вызывающей срезку;

r_i — расстояния между скважиной, в которой определяется срезка, и скважиной, которая вызывает срезку.

Если коэффициенты фильтрации и мощности пласта на участке водозабора изменяются незначительно, то можно их усреднить, определив среднее значение этих параметров ($k_{ср}$, $m_{ср}$). Тогда на основе формул (IV, 9) и (IV, 18):

$$S = \frac{1}{2\pi k_{ср} m_{ср}} \cdot [Q_{сум} \cdot \ln R_п - (Q \cdot \ln r_0 + Q_1 \cdot \ln r_1 + Q_2 \ln r_2 + \ldots + Q_п \cdot \ln r_п)], \qquad \text{(IV, 19)}$$

где $Q_{сум}$ — суммарный дебит всех взаимодействующих скважин водозабора;

Q — дебит скважины, для которой рассчитывается понижение уровня воды (S);

$Q_1, Q_2, \ldots Q_n$ — дебиты скважин, вызывающих срезки и находящихся соответственно на расстояниях r_1, $r_2, \ldots r_п$ от скважины, в которой определяется понижение.

В условиях безнапорных вод формула (IV, 18) приобретает вид:

$$\Delta S_i (2H_i - \Delta S_i) = \frac{Q_i}{\pi k_i} \cdot \ln \frac{R_п}{r_i},$$

где H_i — мощность водоносного пласта до откачки в скважине, вызывающей срезку.

Отсюда

$$\Delta S_i = H_i - \sqrt{H_i^2 - \frac{Q_i}{\pi k_i} \cdot \ln \frac{R_п}{r_i}}. \qquad \text{(IV, 20)}$$

Для скважины, работающей как одиночная, вместо ΔS_i принимается S_0, а вместо $r_i - r_0$.

Определяя понижение уровня воды в скважине при работе ее как одиночной и срезки уровней по формуле (IV, 20), находим по формуле (IV, 1) понижение уровня в скважине в условиях взаимодействия.

Расчет понижения и срезок уровня по формуле (IV, 20) и их последующее суммирование возможны только при большой мощности водоносного горизонта и малом количестве взаимодействующих скважин. В более общем случае расчеты понижения в безнапорных пластах следует проводить по формуле:

$$S_0 = H - \sqrt{H^2 - \frac{1}{\pi k}[Q_{\text{сум}} \ln R_{\text{п}} - (Q \ln r_0 + Q_1 \ln r_1 + \ldots + Q_{\text{п}} \ln r_n)]}. \quad \text{(IV, 21)}$$

Следует заметить, что к расчетам срезок по формуле (IV, 20) целесообразно прибегать лишь в тех исключительных случаях, когда водозабор будет эксплуатироваться с весьма большими понижениями, превышающими половину мощности водоносного пласта. Обычно для расчетов срезок уровней в условиях безнапорных вод можно пользоваться более простой формулой для напорных вод (IV, 8), что можно доказать сопоставлением следующих расчетов.

Определим срезку от работы скважины на расстоянии $r_i = 400$ *м* при следующих данных: дебит $Q_i = 1000$ *м*^{3}*/сутки*; коэффициент фильтрации $k = 10$ *м/сутки*; приведенный радиус влияния $R_{\text{п}} = 2000$ *м*; радиус скважины, в которой определяется понижение, $r_0 = 0{,}1$ *м*. Расчеты произведем при мощностях водоносного горизонта $H = 30$ *м* и $H = 20$ *м*. В первом случае понижение уровня воды в самой скважине (S_0) по формуле (IV, 20) составит 5,8 *м*, во втором 10,7 *м*. Данные расчетов сведены в табл. 6.

Таблица 6

H, *м*	S_0, *м*	$\frac{S_0}{H}$	ΔS, *м*, по формулам	
			(IV, 8)	(IV. 20)
30	5,8	0,19	0,86	0,85
20	10,7	0,64	1,32	1,28

Таким образом, даже при понижениях в скважине, достигающих половины мощности водоносного пласта, срезка уровня на расстоянии 400 *м*, рассчитанная по формулам напорных (IV, 8) и безнапорных (IV, 20) вод отличается всего лишь на несколько сантиметров, что, конечно, не имеет практического значения.

Приведенные выше формулы для расчета понижений во взаимодействующих скважинах справедливы при любом расположении скважин.

Если длина участка расположения водозабора превосходит ширину не более чем в 3—4 раза, причем скважины распределены по площади более или менее равномерно, то такой водозабор можно рассматривать как «большой колодец».

Обычно для определения радиуса большого колодца применяется метод приравнивания площади, на которой расположен водо-

забор, к площади равновеликого круга. Радиус большого колодца принимается равным радиусу этого круга. Вычисленный таким образом радиус большого колодца не учитывает числа скважин водозабора и оказывается существенно завышенным.

Выражение радиуса «большого колодца» получено З. Д. Фаренгольц методом Форхгеймера для различного числа скважин (от 5 до 25), расположенных по сетке и эксплуатируемых с равными дебитами. Принимая понижение в «большом колодце» равным понижению в центральной скважине сетки, З. Д. Фаренгольц получила выражение для радиуса «большого колодца» ($r_к$):

$$r_к = \varphi \sqrt[n]{r_0 \left(\frac{\sqrt{F}}{\sqrt{n}-1}\right)^{n-1}},$$

где φ — коэффициент, зависящий от числа скважин водозабора;
r_0 — радиус скважин;
n — число скважин водозабора;
F — площадь водозабора.

Величина $\sqrt[n]{r_0}$ мало влияет на приведенный радиус «большого колодца» и без сколько-нибудь существенной для практики погрешности можно принять $r_0 = 0{,}1$ *м*.

В этом случае формула радиуса «большого колодца» приобретает вид:

$$r_к = \alpha \sqrt[2n]{F^{n-1}}, \qquad \text{(IV, 22)}$$

где α — коэффициент, зависящий от числа скважин;
F — площадь водозабора в $м^2$.

Значения коэффициента в зависимости от числа скважин приведены в табл. 7.

Таблица 7

n	α
5	0,42
9	0,46
25	0,47
∞	0,56

Если скважины водозабора расположены по одной линии на равных расстояниях друг от друга и эксплуатируются с равным

дебитом, то понижение уровня воды в скважинах этого ряда можно определить, заменив также реальный ряд скважин некоторым «большим колодцем», дебит которого равен суммарному дебиту скважин.

Для определения понижения уровня воды в скважине, располагающейся в середине ряда (здесь понижение наибольшее), величина радиуса большого колодца ($r_к$) может быть определена по формуле Н. Н. Веригина (1961):

$$r_к = \lambda \left(\frac{r_0}{\lambda}\right)^{\frac{1}{n}} \varphi,$$

где λ — расстояние между скважинами;

n — нечетное число скважин ряда;

φ — функция, зависящая от числа скважин ряда.

Эту формулу можно преобразовать следующим образом.

$$r_к = \frac{\varphi l}{n-1} \sqrt[n]{\frac{r_0}{\lambda}} = al, \qquad \text{(IV, 23)}$$

где l — длина ряда, $l = \lambda(n-1)$.

Значения функции φ приведены в табл. 8.

Таблица 8

n	φ	n	φ
3	1,0	13	2,75
5	1,32	15	3,11
7	1,67	17	3,48
9	2,03	19	3,82
11	2,39	21	4,21

Значения коэффициента a показаны на рис. 24, составленном применительно к различным расстояниям между скважинами, выраженным в метрах, и различному числу скважин. При составлении графика радиус скважин принят $r_0 = 0{,}1$ *м* (изменение этого радиуса практически не влияет на величину a).

Вычислив радиус большого колодца ($r_к$), расчеты понижений водозабора производятся по формуле (IV, 9), при принятии $r_0 = r_к$.

Приведем пример расчета радиуса большого колодца. Допустим, что длина линии водозабора $l = 5000$ *м*, число скважин $n = 11$, расстояние между ними $\lambda = 500$ *м*. По графику (рис. 24) $a = 0{,}11$. Следовательно, радиус большого колодца $r_к = a \cdot l = 0{,}11 \cdot 5000 = 550$ *м*.

ПОЛУОГРАНИЧЕННЫЕ ВОДОНОСНЫЕ ПЛАСТЫ

Если участок водозабора располагается вблизи одной из границ пласта, а остальные границы находятся на расстояниях, превышающих влияние откачки, то пласт можно рассматривать как полуограниченный. Пока депрессия не распространилась до границ пласта, формирование воронки происходит как в неограниченном пласте.

Граница пласта, как указывалось, может характеризоваться постоянством напора (когда на границе протекает река, находится озеро и т. п.) или постоянством расхода (граница — водоупорные породы).

ГРАНИЦА С ПОСТОЯННЫМ НАПОРОМ

Представим себе, что в пласте неограниченных размеров заложены две скважины, причем из одной производится откачка, а в другую производится налив воды с тем же дебитом. В результате взаимодействия этих скважин создается гидродинамическое поле, особенностью которого является то, что на линии AB, перпендикулярной линии MN, соединяющей скважины, естественный напор подземных вод не изменится. Линия AB делит отрезок MN пополам (рис. 25). Действительно, эффект понижения уровня, вызванный откачкой, в любой точке на линии AB будет компенсироваться точно таким же эффектом повышения уровня, обусловленного нагнетанием воды в другую скважину. Следовательно, гидроизопьеза AB может рассматриваться как берег реки, горизонт воды в которой при эксплуатации водозабора не изменится.

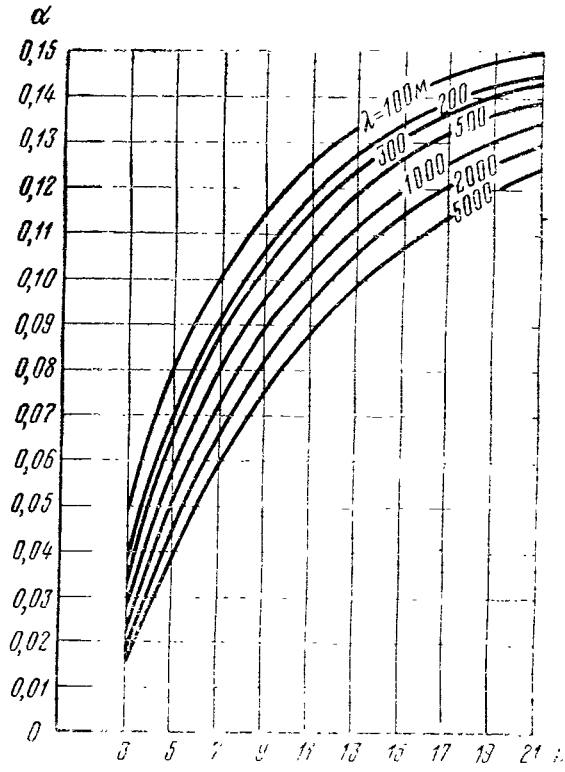


Рис. 24.

Наличие реки или озера, гидравлически связанных с водоносным горизонтом, ограничивает развитие депрессии и поэтому через весьма короткое время понижение уровня воды в скважине стабилизируется. Поэтому расчеты понижения в данных условиях должны производиться по формулам установившегося движения.

Понижение напора в скважине (S_0) равно понижению, которое вызвано откачкой из нее (S_0'), за вычетом того повышения

напора (ΔH), которое обусловлено наливом воды в воображаемую скважину, находящуюся от нее на расстоянии $2l$ (l — расстояние до реки).

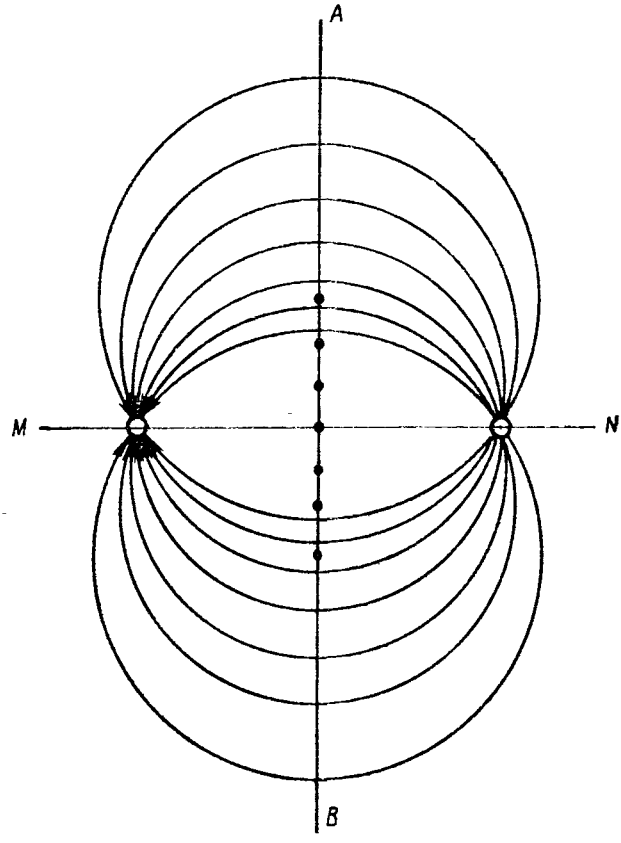


Рис. 25.

По формулам (IV, 9) и (IV, 8), подставив в последнюю $r=2l$, имеем:

$$S_0' = \frac{Q}{2\pi km} \cdot \ln \frac{R_п}{r_0};$$

$$\Delta H = \frac{Q}{2\pi km} \cdot \ln \frac{R_п}{2l}.$$

Вычитая второе выражение из первого, получим:

$$S_0 = S_0' - \Delta H =$$

$$= \frac{Q}{2\pi km} [\ln R_п - \ln r_0 -$$

$$- \ln R_п + \ln 2l]$$

или

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi km} \cdot \ln \frac{2l}{r_0}. \quad \text{(IV, 24)}$$

В условиях безнапорных вод понижение в скважине при ее работе как одиночной определяется по формуле:

$$S_0 = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi R} \cdot \ln \frac{2l}{r_0}}. \quad \text{(IV, 25)}$$

Этот же метод, называемый методом «зеркальных отображений», применяется и для расчета системы взаимодействующих скважин.

Допустим, что скважины A и $Б$ заложены на расстояниях от реки соответственно l и l_1, причем расстояние между скважинами составляет r_i (рис. 26). Требуется определить понижение уровня воды в скважине A при совместной эксплуатации обеих скважин. Расход в скважине A — Q в скважине $Б$ — Q_1. Поместим за берегом реки воображаемые скважины A_1 и $Б_1$ на тех же расстояниях от берега и допустим, что в скважины производится нагнетание воды с расходом соответственно Q и Q_1.

Понижение уровня воды в скважине A будет слагаться из понижения в ней при работе ее как одиночной (S_0) и срезки, вызван-

ной работой скважины $Б$ (ΔS). Понижение S_0 выражается формулой (IV, 24).

Срезка уровня (ΔS) в скважине $А$ равна разности между понижением уровня (ΔS), вызванном откачкой из скважины $Б$ в случае ее заложения в неограниченном пласте, и повышением уровня воды (ΔH) при нагнетании в скважину $Б_1$ в тех же условиях.

Величины ΔS и ΔH можно выразить по формуле (IV, 8):

$$\Delta S' = \frac{Q_1}{2\pi km} \cdot \ln \frac{R_п}{r_1};$$

$$\Delta H = \frac{Q_1}{2\pi km} \cdot \ln \frac{R_п}{\rho_1},$$

где ρ_1 — расстояние от воображаемой скважины $Б_1$ до скважины $А$.

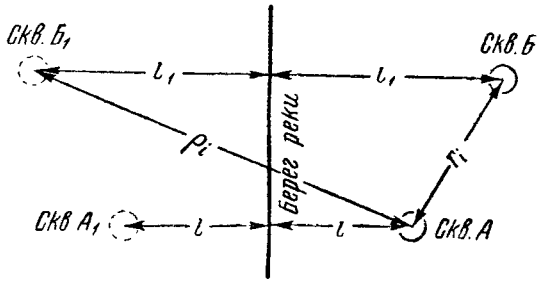


Рис. 26.

Таким образом, срезка уровня в скважине $А$ от работы скважины $Б_1$ составит:

$$\Delta S = \Delta S' - \Delta H = \frac{Q_1}{2\pi km}\left(\ln \frac{R_п}{r_1} - \ln \frac{R_п}{\rho_1}\right) = \frac{Q_1}{2\pi km} \cdot \ln \frac{\rho_1}{r_1}, \quad \text{(IV, 26)}$$

Величины срезок (ΔS) в условиях безнапорных вод, как было показано, можно рассчитывать по этой же формуле, выведенной для напорных вод.

Для определения полного понижения в скважине $А$ в условиях ее взаимодействия со скважиной $Б$ следует сложить понижение S_0 и срезку ΔS.

Если водозабор состоит из нескольких скважин, то срезка определяется от работы каждой из них по формуле (IV, 26), а затем срезки суммируются. Если коэффициенты фильтрации и мощности водоносного пласта в пределах участка изменяются незначительно и могут быть усреднены, то на основе формул (IV, 24) и (IV, 25) полное понижение в скважине (с учетом срезок) выразится следующим образом:

$$S = \frac{1}{2\pi k_{ср} m_{ср}}\left[Q \ln \frac{2l}{r_0} + Q_1 \ln \frac{\rho_1}{r_1} + Q_2 \ln \frac{\rho_2}{r_2} + Q_n \ln \frac{\rho_n}{r_n}\right], \quad \text{(IV, 27)}$$

где $k_{ср}$, $m_{ср}$ — средний коэффициент фильтрации и средняя мощность водоносного пласта;

r_1, $r_2 \ldots r_n$ — расстояния от скважины, в которой рассчитывается понижение, до влияющих на нее скважин;

ρ_1, $\rho_2 \ldots \rho_n$ — расстояние от зеркально отображенных скважин;

Q_1, $Q_2 \ldots Q_n$ — дебиты скважин, оказывающих влияние на скважину, эксплуатируемую с дебитом Q, в которой определяется понижение уровня воды.

Для безнапорных вод

$$S=H-\sqrt{H^2-\frac{1}{\pi k}\left(Q\ln\frac{2l}{r_0}+Q\ln\frac{\rho_1}{r_1}+Q_2\ln\frac{\rho_2}{r_2}+\ldots+Q_n\ln\frac{\rho_n}{r_n}\right)}. \quad \text{(IV, 28)}$$

При большом числе скважин в водозаборе линейного типа расчет понижений в скважине в условиях напорных вод производится по формуле Маскета — Лейбензона:

$$S=\frac{Q}{2\pi km}\left(\ln\frac{\lambda}{2\pi r_0}+\frac{2\pi l}{\lambda}\right), \quad \text{(IV, 29)}$$

где Q — дебит каждой скважины;
λ — расстояние между скважинами в ряду;
l — расстояние ряда от реки.

Для безнапорных вод формула (IV, 29) имеет следующий вид:

$$S=H-\sqrt{H^2-\frac{Q}{\pi k}\left(\ln\frac{\lambda}{2\pi r_0}+\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}. \quad \text{(IV, 30)}$$

Важно заметить, что при расположении водозабора вблизи границы с постоянным напором (река и др.) величина радиуса влияния ($R_п$) в расчеты эксплуатационных запасов не входит, чем эти условия принципиально отличаются от условий неограниченного пласта.

ГРАНИЦА С ПОСТОЯННЫМ РАСХОДОМ

Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай, когда на границе расход подземных вод настолько незначителен, что может быть приравнен нулю.

Представим себе, что из двух скважин, заложенных в неограниченном пласте, в условиях бассейна подземных вод производится одновременная откачка с одинаковым расходом. Тогда в зоне влияния откачки расположение гидроизопьез и линий токов подземных вод будет симметрично относительно линии AB, расположенной по линии тока и секущей перпендикулярно отрезок MN в его середине (рис. 27). Если по оси симметрии AB расположить тонкую непроницаемую пластину, разделяющую водоносный пласт, то гидродинамическая сетка движения совершенно не изменится, и эта пластина не повлияет на понижения уровней воды в скважинах при откачке. Поэтому такая непроницаемая пластина может рассматриваться для каждой из скважины как водоупорная граница, причем одна из скважин является реальной, другая — воображаемой. Следовательно, расчет понижения уровня воды в скважине при наличии водоупорной границы сводится к расчету двух взаимодействующих скважин, из которых одновременно ведется откачка воды.

Понижение напора в скважине будет слагаться из понижения, которое имело бы место в случае работы этой скважины

в неограниченном пласте без взаимодействия (S_0') и дополнительного понижения (срезки), обусловленного работой воображаемой скважины ($\Delta S'$).

Понижение S_0' определяется по формуле (IV, 9), а срезка по формуле (IV, 8). Подставив в последнюю формулу $r=2$, где l — расстояние скважины от границы AB, получим:

$$S_0 = S_0' + \Delta S' = \frac{Q}{2\pi km}\left[\ln\frac{R_п}{r_0} + \ln\frac{R_п}{2l}\right], \qquad \text{(IV, 31)}$$

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi km}\cdot\ln\frac{R_п^2}{2r_0 l}.$$

Для безнапорных вод эта формула имеет выражение:

$$S_0 = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi k}\cdot\ln\frac{R_п^2}{2r_0 l}} \qquad \text{(IV, 32)}$$

В отличие от случая, когда скважина расположена вблизи границы с постоянным напором (например, вблизи реки), где движение становится через которое время установившимся, при водоупорной границе понижение напора в скважине, как это показывают формулы (IV, 31) и (IV, 32), может неограниченно возрастать, так как приведенный радиус влияния ($R_п$) увеличивается во времени. Следовательно, установившегося движения не наступает, и только явления перетекания через подошву и кровлю пласта, как и в неограниченном пласте, могут привести к стабилизации воронки депрессии.

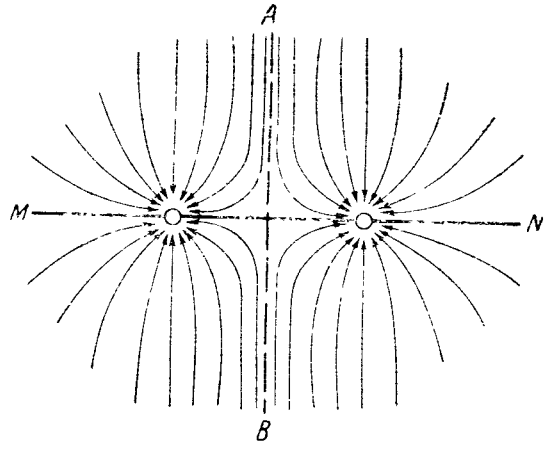


Рис. 27.

Понижение уровня воды в скважине, расположенной вблизи водоупорной границы, при прочих равных условиях больше, чем в неограниченном пласте. Так, например, в скважине, имеющей радиус фильтра 0,1 *м* и находящейся на расстоянии 1 *км* от границы пласта, при значении приведенного радиуса 10 *км* понижение больше, чем в условиях неограниченного пласта, на 15%.

Вывод формулы для расчета понижений взаимодействующих скважин производится методом зеркального отображения.

Расположим воображаемые скважины по другую сторону от границы на тех же расстояниях от нее, что и реальные скважины. Представим себе, что все эти скважины расположены в едином водоносном горизонте, т. е. разделяющий их водоупор отсутствует, и будем производить одновременную откачку, соблюдая усло-

вие, что дебит каждой реальной и соответствующей ей отображенной скважины равны. В результате взаимодействия между группой реальных и воображаемых скважин пройдет водораздельная линия. Поскольку на водоразделе уклон потока равен нулю, то, следовательно, здесь имеется то же условие, что и при примыкании водоносного пласта к водоупору (расход равен нулю).

Срезка уровня (ΔS) слагается из срезки, обусловленной влиянием откачки из реальной ($\Delta S'$) и из воображаемой ($\Delta S''$) скважин, т. е.

$$\Delta S = \Delta S' + \Delta S''$$

или на основе формулы (IV, 8):

$$\Delta S_i = \frac{Q_i}{2\pi km}\left(\ln\frac{R_п}{r_1} + \ln\frac{R_п}{\rho_i}\right) = \frac{Q_i}{2\pi km}\cdot\ln\frac{R_п^2}{r_i\rho_i}, \qquad \text{(IV, 33)}$$

где r_i — расстояние скважины, в которой определяется срезка, до реальной скважины, вызывающей срезку и имеющей дебит Q_i;

ρ_i — то же, до воображаемой скважины.

После определения по формуле (IV, 33) срезок от каждой скважины общее понижение в скважине рассчитывается путем сложения суммы срезок с понижением в самой скважине, определяемого по формуле (IV, 31) в напорных водах или по формуле (IV, 32) в безнапорных водах. При малой изменчивости коэффициентов фильтрации и мощностей пласта можно пользоваться их средними значениями и определять общее (с учетом срезок) понижение в скважине по формуле (IV, 34), в которой срезки просуммированы.

$$S = \frac{1}{2\pi k_{ср} m_{ср}}[2Q_{сум}\ln R_п - (Q\ln 2r_0 l + Q_1\ln r_1\rho_1 + Q_2\ln r_2\rho_2 + \ldots + Q_n\ln r_n\rho_п)]. \qquad \text{(IV, 34)}$$

Для безнапорных вод

$$S = H - \sqrt{H^2 - \frac{1}{\pi k}[2Q_{сум}\ln R_п - (Q\ln 2r_0 l + Q_1\ln r_1\rho_1 + Q_2\ln r_2\rho_2 + \ldots + Q_n\ln r_n\rho_n)]}. \qquad \text{(IV, 35)}$$

ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ-ПОЛОСА

Движение подземных вод к скважине, заложенной в пласте, ограниченном параллельными в плане контурами (пласт-полоса), носит сложный характер. Первое время, пока депрессия не распространилась до границ пласта, приток воды к скважине происходит практически так же, как в неограниченном пласте, затем постепенно влияние границ усиливается. Если границы водоупорные, то поток, который вблизи скважины является радиальным,

уже на расстоянии, примерно равным ширине полосы, приближается к плоскому.

Время, через которое влияние обеих границ должно учитываться по Ф. М. Бочеверу (1959), выражается:

$$t \geqslant 0{,}5\frac{B^2}{a}, \qquad \text{(IV, 36)}$$

где t — время;
B — ширина полосы.

Выразив параметры t и a (IV, 7) через величину приведенного радиуса ($R_п = 1{,}5\sqrt{at}$), получим:

$$B = 0{,}94R_п \approx R_п. \qquad \text{(IV, 37)}$$

Таким образом, влияние обеих границ становится заметным, когда приведенный радиус примерно равен ширине полосы водопроницаемых пород.

Для напорных вод при характерном значении коэффициента пьезопроводности порядка 10^6 *м²/сутки* при ширине полосы 1 *км* влияние границ сказывается уже через 0,5 суток, при ширине полосы 10 *км* — через 50 суток, а в условиях безнапорных вод при коэффициенте уровнепроводности $5 \cdot 10^3$ *м²/сутки* соответственно через 100 и 10000 суток. Следовательно, в безнапорных водах границы начинают оказывать влияние лишь через весьма длительное время. Так что при ширине полосы порядка нескольких километров их влияние может не учитываться.

Если на работу водозабора оказывают влияние две границы, принцип вывода формул остается тем же, что и при одной границе, — применяется метод зеркальных отображений и последующее суммирование понижения в скважине со срезками, вызываемыми откачкой из других скважин водозабора. Однако вывод формул для расчета понижений оказывается более сложным, так как воображаемые (зеркально отраженные) скважины должны рассматриваться затем в условиях влияния друг на друга, т. е. в свою очередь должны отображаться и т. д.

ГРАНИЦЫ С ПОСТОЯННЫМ НАПОРОМ

Примером гидрогеологических условий, характеризующихся постоянством напора на границе водоносного пласта, являются относительно неширокие междуречья, сложенные водопроницаемыми породами. Как отмечалось, при непосредственной гидравлической связи подземных вод с рекой откачка из скважин сопровождается стабилизацией уровней воды в скважинах через относительно короткое время. Это характерно для случая, когда водоносный пласт ограничен реками с двух сторон. Поэтому прогноз понижений в скважине на длительный период эксплуатации производится по формулам установившегося движения.

Понижения напоров в скважинах, заложенных в междуречье, определяются по формулам А. В. Романова. Понижение напора в одиночно работающей скважине составляет:

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi km} \ln\left[\frac{2L}{\pi r_0} \cdot \cos\frac{\pi(l_1 - l_2)}{2l}\right], \qquad \text{(IV, 38)}$$

где L — ширина междуречья;

l_1 и l_2 — соответственно расстояния скважины до рек, ограничивающих междуречье (рис. 28).

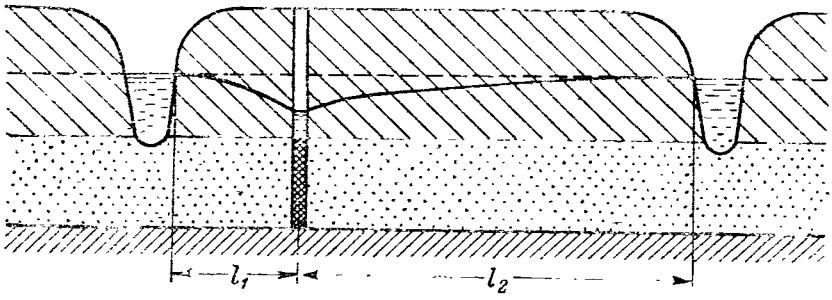


Рис. 28.

Сопоставим понижение напора в скважине, расположенной в середине междуречья, с тем понижением, которое имело бы место при ограничении потока одной рекой, т. е. в полуограниченном потоке. Для этого примем в формуле (IV, 24) расстояние до реки равным половине ширины междуречья ($l = \frac{L}{2}$). В этом случае различие понижений в условиях полуограниченного пласта и пласта-полосы достигает максимума и отношение понижений в середине междуречья, рассчитанное с учетом влияния обеих границ (S_{II}) и только одной границы (S_I), составит:

$$\frac{S_{II}}{S_I} = \frac{\ln\frac{4l}{\pi r_0}}{\ln\frac{2l}{r_0}}.$$

Приняв радиус скважины $r_0 = 0{,}1$ *м*, а расстояние до рек 1000 *м*, по указанному отношению получим $\frac{S_{II}}{S_I} = 0{,}95$. Таким образом, влияние двух границ при расположении одиночной скважины даже в середине междуречья очень мало отличается от влияния одной границы (в рассмотренном случае на 5%) и может не учитываться.

Если водозабор состоит из большого числа скважин, расположенных в ряду, параллельном долинам рек, то понижение в скважинах водозабора (каждая из них работает с дебитом Q) составляет:

для напорных вод

$$S = \frac{Q}{2\pi km}\left(\ln\frac{\lambda}{2\pi r_0} + \frac{2\pi l_1 l_2}{\lambda L}\right); \qquad \text{(IV, 39)}$$

для безнапорных вод

$$S = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi k}\left(\ln\frac{\lambda}{2\pi r_0} + \frac{2\pi l_1 l_2}{\lambda L}\right)}. \qquad \text{(IV, 40)}$$

Сопоставим понижения уровней воды в скважинах в условиях междуречья и в полуограниченном пласте, соответственно выражаемые формулами (IV, 39) и (IV, 29), пренебрегая при этом значением первого члена в скобке $\left(\ln\frac{\lambda}{2\pi r_0}\right)$, как малым по сравнению со вторым членом. Будем считать величину l_1 равной расстоянию водозабора до ближайшей реки, ограничивающей междуречье ($l_1 = l$). Тогда, поделив выражение (IV, 39) на (IV, 29), получим:

$$\frac{S\,(\text{IV, 39})}{S\,(\text{IV, 29})} = 1 - \frac{l_1}{L}.$$

Следовательно, при эксплуатации подземных вод водозаборами линейного типа неограниченной длины, влияние второй границы довольно существенно. Так, если водозабор расположен по оси междуречья ($l_1 = \frac{L}{2}$), то понижение в скважинах будет вдвое меньше, чем на том же расстоянии в потоке, ограниченном одной рекой. По мере приближения водозабора к одной из рек это различие сглаживается, и если, например, водозабор находится от реки на расстоянии, равном одной десятой ширины междуречья, то понижения уровней водозабора составят 90% от понижения в полуограниченном потоке.

Рассмотренные случаи (одна скважина и ряд скважин неограниченной длины) являются предельными. При расчетах понижений в групповом водозаборе можно пользоваться формулой (IV, 38), считая в ней величину r_0 радиусом «большого колодца», определяемого по формулам (IV, 22) или (IV, 23).

ГРАНИЦЫ С ПОСТОЯННЫМ РАСХОДОМ

Наиболее рациональным является расположение скважины посередине полосы, так как в этом случае при прочих равных условиях понижение уровня будет наименьшим.

Для расчета эксплуатационных запасов представляет интерес определение понижения уровня воды в скважине на достаточно длительный период ее работы, соответствующий сроку амортизационного периода водозабора (порядка 20—30 лет). Для этих условий понижение уровня воды в скважине будет таким же, как в одной из скважин ряда «бесконечной» длины. На рис. 29 изображен такой ряд. Линии, направленные перпендикулярно ряду

скважин MN и проходящие через середины расстояний между ними, являются граничными линиями токов, отделяющими зону влияния одной скважины от другой. Это как бы тончайшие водоупорные перегородки. Для одной отдельно взятой скважины ряда эти перегородки можно рассматривать как поверхности двух водоупорных пластов, ограничивающих полосу водопроницаемых пород.

Понижение уровня воды в скважине «бесконечного» ряда в условиях установившегося движения по формуле Маскета — Лейбензона выражается:

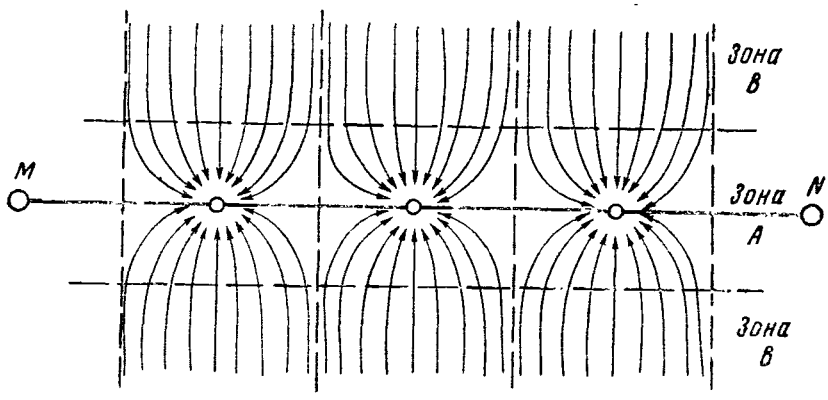


Рис. 29.

$$S = \frac{Q}{2\pi km}\left(\ln\frac{B}{2\pi r_0} + \frac{\pi l}{B}\right), \qquad \text{(IV, 41)}$$

где l — расстояние до контуров питания, находящихся от скважины в равном удалении в обе стороны;

B — ширина полосы водопроницаемых пород, равная расстоянию между скважинами «бесконечного ряда».

При отсутствии фиксированных контуров питания и неограниченной длине полосы величиной l следует считать некоторую приведенную величину, характеризующую «дальность действия» линейного водозабора (L_n), изменяющегося во времени.

Таким образом, формула (IV, 41) может быть записана в следующем виде:

$$S = \frac{Q}{2\pi km}\left(\ln\frac{B}{2\pi r_0} + \frac{\pi L_n}{B}\right). \qquad \text{(IV, 42)}$$

В условиях безнапорных вод:

$$S = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K}\left(\ln\frac{B}{2\pi r_0} + \frac{\pi L_n}{B}\right)}. \qquad \text{(IV, 43)}$$

Первый член в скобках формул (IV, 42) и (IV, 43) выражает сопротивление в зоне A, примыкающей к скважине, где происходит искривление линий токов. Второй член характеризует сопро-

тивление в зоне B, где движение является фактически плоским, т. е. линии токов в плане параллельны друг другу (см. рис. 29).

При длительной работе скважин и распространении депрессии на значительное расстояние понижение в скважине в основном определяется тем сопротивлением, которое поток испытывает в области плоско-параллельного движения (зона B).

Зависимость приведенной длины влияния от времени может быть найдена из сопоставления уравнений неустановившегося и установившегося движения плоского потока. Первая задача имеет решение в теории теплопроводности (Лыков, 1952). Если пользоваться гидрогеологическими обозначениями, то понижение уровня воды в галерее в условиях напорных вод выражается

$$S=\frac{q}{km}\sqrt{\frac{at}{\pi}}, \qquad \text{(IV, 44)}$$

где q — постоянный приток к галерее на единицу ее длины с двух сторон.

Этот приток по формуле Дюпюи для установившегося движения составляет:

$$q=\frac{2kmS}{L_n}. \qquad \text{(IV, 45)}$$

Приравнивая расходы в формулах (IV, 44) и (IV, 45), найдем выражение дальности действия линейного водозабора

$$L_{\text{п}}=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{at}=1{,}125\sqrt{at}. \qquad \text{(IV, 46)}$$

Подставив это значение L_n в формулу (IV, 42), получим:

$$S=\frac{Q}{2\pi km}\left(\ln\frac{B}{2\pi r_0}+\frac{3{,}55\sqrt{at}}{B}\right). \qquad \text{(IV, 47)}$$

Сопоставим величины приведенного радиуса ($R_{\text{п}}$) в условиях радиального потока и приведенной дальности действия линейного водозабора ($L_{\text{п}}$) в плоском потоке, воспользовавшись формулами (IV, 7) и (IV, 46):

$$\frac{R_{\text{п}}}{L_{\text{п}}}=\frac{1{,}5\sqrt{at}}{1{,}125\sqrt{at}}=1{,}32.$$

Таким образом, на тот же момент времени t от начала откачки ее влияние в радиальном потоке распространяется дальше, чем в плоском. Однако влияние приведенного радиуса на понижение уровня воды в водозаборе в радиальном потоке значительно меньше, чем в плоском, так как в радиальном потоке понижение зависит от логарифма $R_{\text{п}}$ (IV, 8), а в плоском при длительной эксплуатации пропорционально величине: L (IV, 45).

Следовательно, при прочих равных условиях понижение уровня воды в скважине, заложенной в пласте-полосе, происходит гораздо

быстрее, чем в неограниченном пласте. Объясняется это тем, что в неограниченном пласте вода притекает к скважине со всех сторон, а в пласте-полосе фронт питания скважины сильно сужен и для обеспечения того же дебита скважины понижение в ней должно быть больше и увеличиваться во времени быстрее.

Более общий случай расположения скважины в пласте-полосе рассмотрен Ф. М. Бочевером (1959), которым получена следующая формула:

$$S=\frac{Q}{2\pi km}\left(\ln\frac{0{,}16B}{r_0\sin\frac{\pi l}{B}}+\frac{3{,}55\sqrt{at}}{B}\right), \qquad \text{(IV, 48)}$$

где l — расстояние скважины от ближайшей водоупорной границы.

При расположении скважины посередине полосы:

$$l=\frac{B}{2};\quad \sin\frac{\pi l}{B}=\sin\frac{\pi}{2}=1.$$

Тогда формула (IV, 48) обращается в формулу (IV, 47), которая соответствует частному случаю расположения скважины на равных расстояниях от границ полосы. Обычно в пределах полосы водозабор состоит из нескольких скважин, располагающихся в ряд, пересекающий пласт-полосу перпендикулярно ее границам. Расчет понижений в скважинах производится в этом случае также по формулам (IV, 42) и (IV, 43) при принятии в них за величину B среднего расстояния между скважинами ряда.

РАЗНОРОДНЫЕ ГРАНИЦЫ

Пласт-полоса может иметь разнородные границы: на одной из них расход потока при эксплуатации водозабора не изменяется (обычно он может быть принят равным нулю), а на другой — изменяется, но напор сохраняется постоянным. Такие условия свойственны, например, подземным водам в речных террасах, сложенных песчаными отложениями, вложенными в водоупорные коренные породы. Тогда на границе с последними соблюдается условие $Q=\text{const}=0$, а на другой границе, очерченной руслом реки, $H=\text{const}$ (рис. 30).

При работе водозабора в этих условиях через непродолжительное время, безусловно меньшее, чем срок, на который рассчитываются эксплуатационные запасы, движение практически стабилизируется. Поэтому расчеты понижений уровня производятся по формулам установившегося движения.

Понижение уровня воды в одиночной скважине по формуле, предложенной Н. А. Огильви (1951), выражается:

$$S_0=\frac{Q}{2\pi km}\cdot\ln\left[\frac{1{,}13B}{r_0}\operatorname{ctg}\frac{\pi(B-l)}{2B}\right], \qquad \text{(IV, 49)}$$

где B — ширина полосы водопроницаемых пород;

l — расстояние скважины от реки.

Для безнапорных вод эта формула имеет вид:

$$S_0 = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi k} \ln\left[\frac{1{,}13B}{r_0} \operatorname{ctg} \frac{\pi(B-l)}{2B}\right]}. \qquad \text{(IV, 50)}$$

Влияние водоупорного контура на понижение невелико. Так, если ширина полосы 1000 *м* и скважина расположена в 100 *м* от водоупорной границы, то понижение в ней при прочих равных условиях только на 15% больше, чем при отсутствии этой границы.

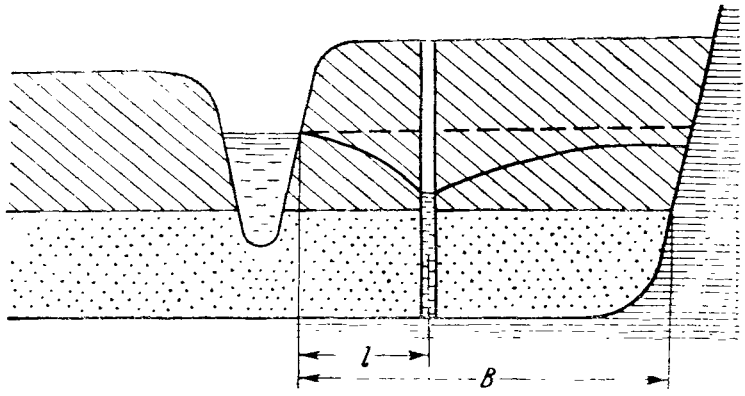


Рис. 30.

При заложении скважины посередине полосы наличие водоупорной границы практически не влияет на понижение.

Формулы (IV, 49) и (VI, 50) при очень малом расстоянии скважины от водоупорной границы оказываются недостаточно точными и значительно завышают величину понижения уровня. Так, при $l \to B$, $\operatorname{ctg}\frac{\pi(B-l)}{2B} \to 0$, а поскольку $\operatorname{ctg}0 = \infty$, то $S \to \infty$. В действительности же при расположении скважины у самого водоупора понижение в ней будет только вдвое больше, чем при отсутствии водоупора.

ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ, ОГРАНИЧЕННЫЙ КРУГОВЫМ КОНТУРОМ

Любой водоносный пласт имеет замкнутые в плане границы. Однако при относительно небольших (по сравнению со всей площадью распространения водоносного горизонта) размерах районной депрессии водозабора удаленные границы мало влияют на эксплуатационные запасы и при их оценке можно: а) пренебречь влиянием всех границ (неограниченный пласт), б) учитывать только одну границу (полуограниченный пласт), в) учитывать две границы (пласт-полоса).

При небольшой площади распространения водоносного горизонта на формирование депрессионной воронки через некоторое время во все большей мере начинают влиять все границы водоносного пласта. При этом в большинстве случаев реальный контур водоносного пласта можно заменить некоторым круговым контуром, радиус которого ($R_к$) определяется путем приравнивания площади распространения водоносного горизонта (F) к площади равновеликого круга:

$$R_к = \sqrt{\frac{F}{\pi}} = 0{,}565\sqrt{F}. \qquad \text{(IV, 51)}$$

Контур, ограничивающий водоносный пласт, может характеризоваться весьма разнообразными гидрогеологическими условиями, предельными случаями которых являются:

а) контур, на котором напор подземных вод может рассматриваться как постоянный, не изменяющийся под влиянием водозабора (например, расположение водозабора на острове, на участке между руслом реки и дугообразно изогнутой старицей);

б) водоносный пласт оконтурен водоупорными породами и на границах пласта расход подземных вод равен нулю (например, небольшие мульды, ограниченные выходами слабопроницаемых пород).

ГРАНИЦА С ПОСТОЯННЫМ НАПОРОМ

Понижение уровня воды в скважине, заложенной в центре участка, ограниченного круговым контуром питания, практически устанавливается через короткое время.

Понижение уровня воды в скважине определяется по классическим формулам Дюпюи:

для напорных вод

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi km} \cdot \ln\frac{R_к}{r_0}; \qquad \text{(IV, 52)}$$

для безнапорных вод

$$S_0 = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi k} \cdot \ln\frac{R_к}{r_0}}. \qquad \text{(IV, 53)}$$

ГРАНИЦА С ПОСТОЯННЫМ РАСХОДОМ

При водоупорных границах водоносного пласта движение подземных вод к скважине имеет резко выраженный неустановившийся характер и понижения в скважине непрерывно возрастают во времени. При длительной работе скважины, расположенной в центре мульды, величина понижения в зоне ее влияния может быть определена по формуле Маскета:

$$S = \frac{Q}{2\pi km}\left[\ln\frac{R_к}{r} + \frac{2at}{R_к^2} - \frac{3}{4}\right], \qquad \text{(IV, 54)}$$

где r — расстояние от скважины до точки, в которой определяется понижение S.

Соответственно для безнапорных вод

$$S=H-\sqrt{H^2-\frac{Q}{\pi k}\left(\ln\frac{R_к}{r}+\frac{2a_y t}{R_к^2}-\frac{3}{4}\right)}. \qquad \text{(IV, 55)}$$

Важно обратить внимание на то, что время (t) входит в формулу (IV, 54) в первой степени, а не под знаком логарифма, как в формулу, соответствующую условиям неограниченного пласта (IV, 6). Следовательно, понижение уровня воды в пласте, ограниченном водоупорными породами, происходит значительно быстрее, чем в неограниченном пласте, так как поступление воды к скважине в связи с развитием депрессии может происходить только за счет сработки естественных запасов в пределах площади, ограниченной водоупорным контуром.

Для определения понижения уровня (S_0) воды в скважине, из которой производится откачка, в формулах (IV, 54) и (IV, 55) надо положить

$$S=S_0; \quad r=r_0.$$

Формула (IV, 54) после этой подстановки и раскрытия скобок преобразуется Ф. М. Бочевером следующим образом:

$$S_0=\frac{Q}{2\pi km}\cdot\ln\frac{0{,}47R_к}{r_0}+\frac{Qat}{\pi kmR_к^2}. \qquad \text{(IV, 56)}$$

Первое слагаемое выражает понижение в скважине по формуле Дюпюи в условиях установившегося движения при радиусе питания 0,47 $R_к$. Обозначим его S'. Второе слагаемое, обозначенное S'', выражает уменьшение объема воды в пласте при эксплуатации, в чем можно убедиться, если рассмотреть условия безнапорных вод. В этом случае в формуле (IV, 56) вместо коэффициента пьезопроводности a следует поставить коэффициент уровнепроводности $a_y=\frac{k\cdot h_{ср}}{\mu}$.

Приняв $m=h_{ср}$, получим:

$$S''=\frac{Qa_y t}{\pi kmR_к^2}=\frac{Qt}{\pi\mu R_к^2}=\frac{Qt}{\mu F}, \qquad \text{(IV, 57)}$$

где F — площадь распространения водоносного горизонта.

Qt представляет собой общий объем воды (V), откачанной за время t, поэтому:

$$S''=\frac{V}{\mu F}. \qquad \text{(IV, 58)}$$

Величина $\frac{V}{\mu F}=S''$ представляет собой понижение уровня, которое более или менее равномерно по площади распространения водоносного горизонта, так как в данных условиях депрессионные

кривые перемещаются во времени параллельно себе (квазистационарный режим). Общее понижение в скважине составляет $S_0 = S' + S''$, что схематично показано на рис. 31.

Понижение S' обусловлено тем сопротивлением, которое преодолевается при движении воды по пласту к скважине, понижение S'' — осушением пласта (безнапорные воды) или изъятием воды при упругом режиме (напорные воды).

В некоторых гидрогеологических условиях этот процесс понижения уровня подземных вод может сильно замедлиться и даже приостановиться, т. е. движение станет установившимся. Например, если водоносный пласт, из которого откачивается вода, находится в гидравлической связи с потоком грунтовых вод, который в естественных условиях проходил «транзитом», то при образовании депрессии этот поток частично или полностью может привлекаться к водозабору (см. рис. 16). В этих условиях, если дебит водозабора не превышает естественного расхода потока, то через некоторое время наступает стабилизация уровней воды в скважинах.

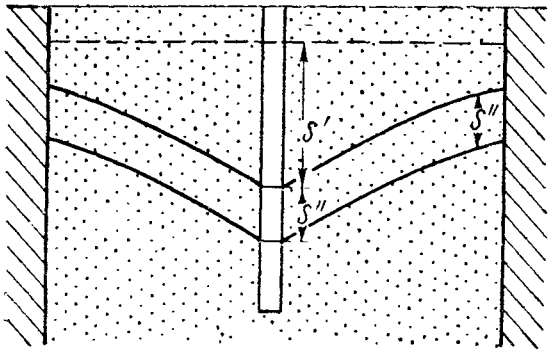


Рис. 31.

Подобное же явление имеет место в тех случаях, когда уровень грунтовых вод располагается на такой небольшой глубине, что испарение с поверхности грунтовых вод в естественных условиях было равно питанию их атмосферными осадками. При образовании депрессии испарение с поверхности грунтовых вод уменьшится или прекратится и, следовательно, возникнет питание водоносного горизонта инфильтрацией атмосферных осадков. Если отбор воды не превосходит величины этого питания, то через некоторое время произойдет стабилизация уровней воды в скважинах водозабора.

Следует иметь в виду, что стабилизация понижений в рассмотренных выше случаях объясняется равенством отбора воды из скважин увеличению питания водоносного горизонта при эксплуатации. Если усиления питания водоносного горизонта при образовании депрессионной воронки не происходит, то независимо от расхода естественного потока стабилизации понижений не наступает.

Глава V

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

При определении эксплуатационных запасов гидравлические методы применяются для установления зависимости понижения в скважине от ее дебита и расчета взаимодействия скважин.

КРИВЫЕ ДЕБИТА

Дебит скважины и понижение уровня воды в ней связаны функциональной зависимостью. В гидрогеологической литературе понижение обычно рассматривается как аргумент, а дебит — как функция, что было правильно, когда не существовало насосов, способных поднимать воду с большой глубины. В этих случаях задавались понижением, лимитированным пределом всасывания насоса, и определяли соответствующий ему дебит скважины. В настоящее время в связи с широким применением глубинных насосов положение радикально изменилось. Поэтому при расчетах следует задаваться дебитом скважины как элементом эксплуатационных запасов подземных вод и определять соответствующее ему понижение динамического уровня воды в скважине. Это не только правильно по существу, но и удобнее для расчетов, так как для того, чтобы рассчитать дебит скважины в условиях взаимодействия при заданных понижениях, было бы необходимо каждый раз решать совместно столько уравнений, сколько скважин в водозаборе, что практически невозможно без применения машинной математики.

По приведенным соображениям величину дебита скважины следует рассматривать как аргумент, а понижение — как его функцию.

Кривые дебита, выражающие зависимость понижения от дебита, строятся по данным опытных откачек, производящихся минимумом с двумя дебитами, и экстраполируются для определения понижения в скважине при запроектированном дебите. Уравнения кривых дебита в напорных и безнапорных водах несколько отличаются.

В напорных водах, как это следует из формулы Дюпюи, понижение увеличивается пропорционально дебиту, т. е. удельный дебит — величина постоянная. Определение эксплуатационного

понижения ($S_э$) при эксплуатационном дебите ($Q_э$) связано следующей зависимостью с понижением (S) и дебитом (Q) при опытной откачке:

$$S_э = \frac{Q_э}{Q} \cdot S. \qquad \text{(V, 1)}$$

Теоретическая зависимость между понижением и дебитом учитывает только сопротивление движению воды в водоносном пласте, происходящее при ламинарном режиме, но не принимает во внимание потери напора в стволе скважины, где движение турбулентно, а также возможность возникновения турбулентности в фильтре и в призабойной зоне. Исходя из того, что в одной области движения воды проявляется ламинарный режим, а в другой — турбулентный, Дюпюи была предложена следующая эмпирическая формула для построения кривой дебита в условиях напорных вод:

$$S = aQ + bQ^2, \qquad \text{(V, 2)}$$

где a и b — эмпирические параметры, определяемые при опытных откачках.

Параметр a как бы выражает «долю» участия ламинарного движения, параметр b — турбулентного движения в общем расходе воды. С увеличением дебита скважины роль турбулентного движения относительно возрастает, что учитывается формулой (во втором слагаемом величина Q входит в квадрате). При $b=0$, т. е. когда во всей области фильтрации движение ламинарное, зависимость дебита от понижения оказывается линейной, что соответствует теоретической формуле Дюпюи для напорных вод (V, 1).

Чтобы построить кривую дебита и экстраполировать ее до заданного расхода, следует определить в формуле (V, 2) параметры a и b. Для этого необходимо иметь данные о понижениях S_1 и S_2 при двух расходах Q_1 и Q_2, что позволяет составить два уравнения по формуле (V, 2), решение которых дает значения параметров a и b:

$$a = \frac{S_2}{Q_2} - bQ_2; \qquad \text{(V, 3)}$$

$$b = \frac{\frac{S_2}{Q_2} - \frac{S_1}{Q_1}}{Q_2 - Q_1}. \qquad \text{(V, 4)}$$

Для уменьшения возможной ошибки при экстраполяции понижения на больший (эксплуатационный) дебит один из расходов при опытной откачке должен быть максимальным для насоса, которым производится откачка.

Весьма прост и нагляден графоаналитический метод построения кривой дебита по уравнению (V, 2), предложенный М. Е. Аль-

товским (1940). Разделив обе части уравнения на Q, получим уравнение прямой:

$$\frac{S}{Q} = a + bQ. \qquad \text{(V, 5)}$$

По данным откачек, произведенных при двух дебитах, вычисляются отношения $\frac{S}{Q}$, т. е. величины, обратные удельным дебитам. Затем строится график, по оси ординат которого откладыва-

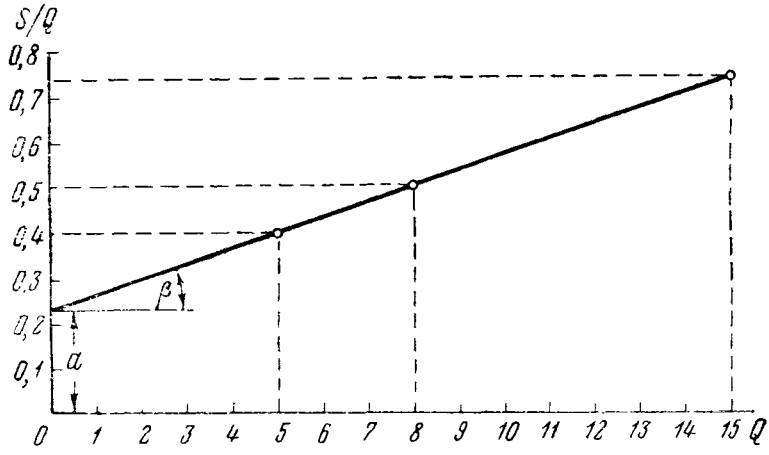


Рис. 32.

ются значения $\frac{S}{Q}$, а по оси абсцисс значения Q (рис. 32). Через полученные точки проводится прямая, начальная ордината которой выражает параметр Q, а тангенс угла β равен значению параметра b. Вычислять значения этих параметров нет, однако, необходимости. Для определения понижения при проектном дебите достаточно продолжить прямую до точки, соответствующей этому дебиту, найти значение $\frac{S_э}{Q_э}$ по шкале ординат и затем вычислить $S_э$.

Приведем пример расчета. Допустим, что при опытных откачках с дебитом $Q_1 = 5$ *л/сек* и $Q_2 = 8$ *л/сек* понижения соответственно были $S_1 = 2$ *м* и $S_2 = 4$ *м*. Требуется определить понижение уровня при дебите 15 *л/сек*. Вычисляем отношения $\frac{S_1}{Q_1} = \frac{2}{5} = 0{,}4$ и $\frac{S_2}{Q_2} = \frac{4}{8} = 0{,}5$. Наносим эти точки, имеющие координаты (5 и 0,4) и (8 и 0,5) на график (см. рис. 32) и проводим через них прямую, продолжая которую, находим, что эксплуатационному дебиту 15 *л/сек* соответствует отношение $\frac{S_э}{Q_э} = 0{,}74$. Следовательно, по-

нижение уровня воды в скважине при расходе 15 *л/сек* составит: $S_э = 15 \cdot 0{,}74 = 11{,}1$ *м*.

В условиях безнапорных вод зависимость между дебитом и понижением выражается теоретической формулой Дюпюи:

$$Q = \frac{\pi k S (2H - S)}{\ln \frac{R}{r_0}}.$$

Эту формулу можно преобразовать следующим образом:

$$Q = mS - nS^2,$$

где

$$m = \frac{2\pi kH}{\ln \frac{R}{r_0}}; \qquad \text{(V, 6)}$$

$$n = \frac{\pi k}{\ln \frac{R}{r_0}}.$$

При опытных откачках с двумя расходами Q_1 и Q_2 и соответственно понижениями S_1 и S_2 получим два уравнения, решая которые совместно, определим параметры m и n:

$$n = \frac{\frac{Q_1}{S_1} - \frac{Q_2}{S_2}}{S_2 - S_1}; \qquad \text{(V, 7)}$$

$$m = \frac{Q_1}{S_1} + nS_1. \qquad \text{(V, 8)}$$

Решая квадратное уравнение (V, 6) относительно S, получим:

$$S = \frac{m - \sqrt{m^2 - 4nQ}}{2n}. \qquad \text{(V, 9)}$$

По этой формуле можно определить понижение в скважине, задавшись эксплуатационным дебитом.

Формулой (V, 6) не учитываются возможность возникновения турбулентности движения воды в призабойной зоне (особенно при больших понижениях), сопротивление фильтра скважины и потери напора в стволе скважины при откачке. Исключительно большое внимание на кривую дебита может оказать неоднородность пласта, так как при осушении пласта изменяются не только его мощность, но (при неоднородности его в вертикальном направлении) и среднее значение коэффициента фильтрации.

Если водопроницаемость пласта с глубиной убывает (рис. 35, *в*), то при углублении депрессии среднее значение коэффициента фильтрации уменьшается, так как осушается наиболее

водопроницаемая — верхняя — зона. Такие условия характерны, например, для пластов и массивов скальных пород, трещиноватость которых с глубиной затухает. В этих случаях прогнозируемое понижение уровня воды в скважине окажется больше, чем определенное по теоретической формуле при принятии пласта однородным (см. рис. 33, *а*). Если, наоборот, водопроницаемость с глубиной увеличивается, то при осушении пласта среднее значение коэффициента фильтрации возрастает и прогнозируемые понижения уровня окажутся преувеличенными (см. рис. 33, *б*). Такие условия характерны для аллювиальных отложений речных террас, которые обычно в своей верхней части сложены супесями и мелкозернистыми песками, т. е. относительно слабопроницаемыми породами, а в нижней — крупнозернистыми гравелистыми песками, из которых в основном и питается скважина. До тех пор пока уровень воды в скважине не снизится до подошвы слабопроницаемого слоя, кривая дебита близка к той, которая свойственна напорным водам (понижение пропорционально дебиту).

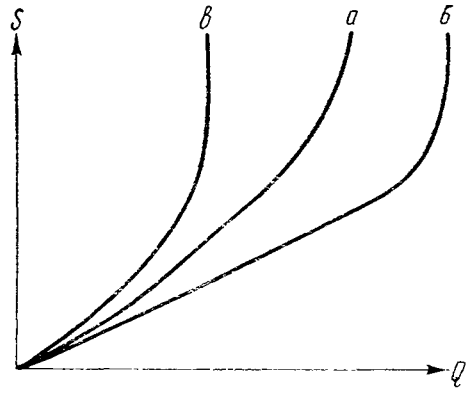


Рис. 33. Кривые дебита скважин

а — при однородности пласта; *б* — при увеличении водопроницаемости с глубиной; *в* — при уменьшении водопроницаемости с глубиной

Следовательно, при экстраполяции кривой дебита в безнапорных водах по теоретической формуле могут возникать ошибки, имеющие разный знак. В связи с этим для построения кривых дебита в безнапорных водах, в тех случаях, когда имеются основания считать водоносный пласт существенно неоднородным в вертикальном направлении, опытные откачки следует производить не с двумя, а с тремя понижениями. В этих же случаях целесообразно (особенно в закарстованных породах) производить зональные опытные откачки или исследовать водопроницаемость методом резистивиметрии. Экстраполяцию данных опытных откачек для построения кривой дебита можно производить лишь на такую глубину, при которой уровень воды в скважине не падает ниже подошвы слоя, водопроницаемость которого более или менее постоянна. В случаях, когда наблюденная кривая дебита значительно отклоняется от теоретической, можно пользоваться эмпирическими зависимостями (Альтовский, 1940).

В условиях относительно однородного пласта в безнапорных водах допустима экстраполяция, не превышающая в 1,5—2 раза максимальный дебит, достигнутый при опытных откачках. В напорных водах предел возможной экстраполяции повышается до 2,4—3 раз.

РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СКВАЖИН

Расчет срезок уровней при взаимодействии скважин по формулам гидродинамики при значительной неоднородности пласта может приводить к существенным ошибкам при оценке эксплуатационных запасов.

Допустим, что скважина *А*, из которой производится откачка, заложена на участке, на котором водопроницаемость пород меньше, чем на участке, где заложена скважина *Б* (рис. 34, а). Пьезометрическая кривая, рассчитанная по теоретической формуле по данным о коэффициенте фильтрации, определенном в скважине *А*, на некоторый момент времени должна занять положение MN, а величина срезки в скважине *Б* — составить ΔS. В действительности, вследствие большей водопроницаемости пласта в зоне скважины *Б* пьезометрическая кривая расположится выше (линия MN_1) и истинная срезка ($\Delta S_д$) окажется меньше рассчитанной по теоретической формуле.

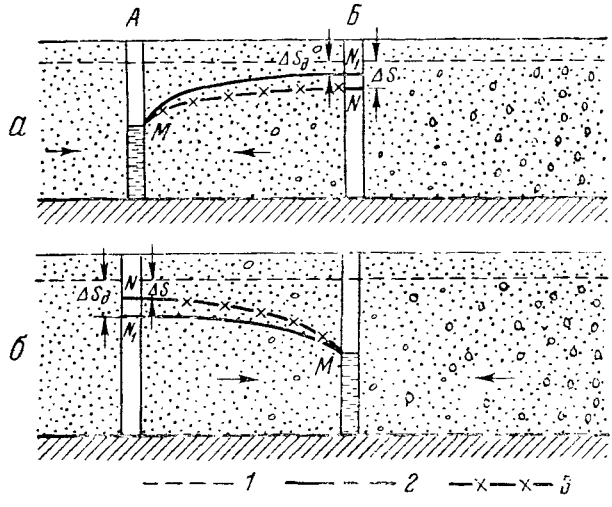


Рис. 34. Срезка уровней при откачках при неоднородности пласта

1 — уровень подземных вод до откачки; *2* — кривая депрессии, рассчитанная по теоретической формуле; *3* — фактическая кривая депрессии

Это объясняется тем, что среднее значение коэффициента фильтрации в зоне влияния откачки больше, чем определенное опытной откачкой из скважины *А*. Поскольку коэффициент фильтрации входит в знаменатель формул, по которым определяются срезки уровней, то преуменьшение коэффициента фильтрации в расчетах приводит к завышению срезки.

Если же откачка производится из скважины *Б*, то, наоборот, действительная срезка в скважине *А* больше, чем определенная из предпосылки однородности пласта (см. рис. 34, б). При большом количестве скважин возможность ошибки при определении срезок возрастает. В связи с этим предложение М. Е. Альтовского (1947) рассчитывать взаимодействие скважин по срезкам, непосредственно наблюдаемым при опытных откачках, в некоторых случаях является целесообразным.

Как указывалось, понижение уровня воды в скважине группового водозабора слагается из понижения (S_0), обусловленного откачкой из этой скважины при работе ее как одиночной, и суммы понижений (срезок), вызванных работой остальных скважин во-

дозабора (формула (IV, 1). Величина S_0 определяется по кривой дебита применительно к проектному дебиту скважин. Срезки, наблюдаемые при откачках из других скважин, влияющих на данную скважину, должны быть увеличены во столько раз, во сколько проектные дебиты этих скважин больше дебитов при опытных откачках. Допустимость такой линейной экстраполяции и для безнапорных вод была показана ранее.

Таким образом:

$$S = S_0 + \Delta S_1 \frac{Q_1}{Q_1'} + \Delta S_2 \frac{Q_2}{Q_2'} + \ldots + \Delta S_n \frac{Q_n}{Q_n'}, \qquad (V, 10)$$

где ΔS_1, $\Delta S_2 \ldots \Delta S_n$ — понижения (срезки) при опытных откачках;

Q_1', $Q_2' \ldots Q'_n$ — дебиты скважин при опытных откачках, вызвавшие эти срезки;

Q_1, $Q_2 \ldots Q_n$ — проектные дебиты тех же скважин.

Расчет взаимодействия скважин гидравлическим методом допустим в тех случаях, когда при опытных откачках достигнута практическая стабилизация уровней, что наблюдается, например, на участках, расположенных неподалеку от рек, озер и т. п.

Если стабилизация не наступила, то применение гидравлического метода для расчета взаимодействия скважин может привести к существенному преуменьшению прогнозируемых понижений в условиях длительной эксплуатации водоносного горизонта. В таких условиях расчеты понижений по гидравлическому методу требуют внесения поправок на изменение уровней воды во времени или контрольных расчетов восполнения запасов подземных вод балансовыми методами.

Глава VI

СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Как отмечалось, гидравлические методы прогноза понижений уровня воды в скважинах при эксплуатации наиболее полно и суммарно учитывают неоднородность водоносного пласта, сопротивление при поступлении воды в скважину, явления турбулентности, что и является основным достоинством этих методов. Однако гидравлическими методами нельзя определить дополнительного, иногда очень значительного понижения в скважинах водозабора, которое обусловлено развитием депрессионной воронки во времени. Эта задача может быть решена только на основе расчетов по соответствующим формулам гидродинамики.

Совместное применение гидравлических и гидродинамических методов является весьма эффективным. Определяя величину понижений непосредственным опытом, а ее изменение во времени по теоретическим формулам, мы добиваемся уменьшения возможной погрешности прогноза.

Необходимо отметить, что судить о понижениях уровней воды в скважине в условиях длительной эксплуатации непосредственно по величинам, измеряемым при опытных откачках с последующей экстраполяцией во времени, можно только в тех случаях, когда граничные условия при эксплуатации остаются теми же, что и при опытных откачках. Если во время опытной откачки депрессия не успела распространиться до границ водоносного пласта, а при длительной эксплуатации их влияние окажется существенным, то экстраполяция во времени понижений, установленных при опытных откачках, приведет к ошибке прогноза, знак которой зависит от типа границ пласта. В тех случаях, когда депрессия распространится до реки и снижение уровней практически прекратится, экстраполяция во времени данных опытных откачек даст преувеличенные значения действительных понижений в условиях эксплуатации. Наоборот, если водоносный пласт ограничен водоупорными породами, то понижения напоров будут происходить более быстрыми темпами, чем это можно было бы предполагать по данным опытных откачек.

РАСЧЕТ ПОНИЖЕНИЯ В СКВАЖИНЕ, РАБОТАЮЩЕЙ БЕЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Понижение в скважине, работающей без взаимодействия (S_0), по Ф. М. Бочеверу, можно выразить так:

$$S_0 = S_0' + S_0'', \qquad \text{(VI, 1)}$$

где S_0' — понижение, определенное по кривой дебита для заданного эксплуатационного дебита $Q_э$;

S_0'' — дополнительное понижение за время от окончания опытной откачки до конца срока, на который рассчитываются эксплуатационные запасы.

Определение величины S_0'' производится по данным опытных откачек с использованием теоретических зависимостей понижений от времени.

На основе формулы (IV, 6) можно написать следующие однотипные уравнения:

$$Z_1 = \frac{Q_{оп}}{4\pi km} \cdot \ln \frac{2{,}25at_1}{r_0^2};$$

$$Z_2 = \frac{Q_{оп}}{4\pi km} \cdot \ln \frac{2{,}25at_2}{r_0^2};$$

$$Z_э = \frac{Q_{оп}}{4\pi km} \cdot \ln \frac{2{,}25at_э}{r_0^2},$$

где Z_1 — понижение уровня воды в скважине на момент времени t_1 от начала опытной откачки;

Z_2 — то же через время t_2 в конце опытной откачки;

$Z_э$ — понижение, которое бы имело место в скважине на конец периода эксплуатации ($t_э$), если бы она происходила с тем же дебитом ($Q_{оп}$), что и при опытной откачке.

Совместное решение этих уравнений с тремя неизвестными (km, a и $Z_э$) дает:

$$Z_э - Z_2 = (Z_2 - Z_1) \cdot \frac{\lg t_э - \lg t_2}{\lg t_2 - \lg t_1}, \qquad \text{(VI, 2)}$$

где разность ($Z_э$—Z_2) выражает увеличение понижения в скважине на конец периода эксплуатации по сравнению с тем, которое было в конце опытной откачки (дебит скважины тот же, что при опытной откачке).

Понижения уровней прямо пропорциональны дебитам, поэтому:

$$\frac{S_0''}{Z_э - Z_2} = \frac{Q_э}{Q_{оп}}, \qquad \text{(VI, 3)}$$

где $Q_э$ — эксплуатационный дебит скважины.

Из (VI, 2) и (VI, 3) следует:

$$S_0'' = \frac{Q_э}{Q_{оп}}(Z_2 - Z_1)\frac{\lg t_э - \lg t_2}{\lg t_2 - \lg t_1}. \qquad \text{(VI, 4)}$$

При подстановке в формулу (VI, 1) выражения S_0'' получим понижение в скважине при работе ее как одиночной на конец периода эксплуатации

$$S_0 = S_0' + \frac{Q_э}{Q_{оп}}(Z_2 - Z_1)\frac{\lg t_э - \lg t_2}{\lg t_2 - \lg t_1}. \qquad \text{(VI, 5)}$$

РАСЧЕТ СРЕЗОК УРОВНЕЙ

Допустим, что при опытной откачке из скважины с дебитом $Q_{оп}$ через время t_2 в другой скважине произошло понижение уровня подземных вод ΔZ_2. Если бы откачка производилась с дебитом $Q_э$, при котором предполагается эксплуатировать скважину, то срезка ($\Delta S'$) за это же время была бы больше наблюдаемой во столько раз, во сколько эксплуатационный дебит скважины больше дебита опытной откачки.

Следовательно:

$$\Delta S' = \frac{Q_э}{Q_{оп}} \cdot \Delta Z_2. \qquad \text{(VI, 6)}$$

За время эксплуатации срезка увеличится на величину $\Delta S''$, величина которой может быть определена по формуле, аналогичной формуле (VI, 5):

$$\Delta S'' = \frac{Q_э}{Q_{оп}}(\Delta Z_2 - \Delta Z_1)\frac{\lg t_э - \lg t_2}{\lg t_2 - \lg t_1}, \qquad \text{(VI, 7)}$$

где ΔZ_1 — срезка, наблюденная при опытной откачке через время t_1 от ее начала;

ΔZ_2 — то же время t_2 (конец опытной откачки)

Срезка уровня на конец периода эксплуатации ($t_э$) составит:

$$\Delta S = \Delta S' + \Delta S'' = \frac{Q_э}{Q_{оп}}\left[\Delta Z_2 + (\Delta Z_2 - \Delta Z_1)\frac{\lg t_э - \lg t_2}{\lg t_2 - \lg t_1}\right]. \qquad \text{(VI, 8)}$$

Общее понижение в скважине определяется по формуле (IV, 1):

$$S = S_0 + \Delta S_1 + \Delta S_2 + \ldots + \Delta S_n,$$

где индексы $1, 2, \ldots, n$ соответствуют номерам скважин, откачки из которых вызывают срезки уровня в данной скважине.

Формулу (VI, 8) можно применять для расчетов ΔS только в тех случаях, когда разность понижений в скважине, на которую оказывает влияние откачка из другой скважины ($\Delta Z_2 - \Delta Z_1$) до-

статочно заметна и может быть измерена более или менее точно. Для удаленных скважин это далеко не всегда возможно. В таких случаях расчет величины ΔS должен производиться иным путем.

В условиях квазистационарного движения пьезометрические кривые непрерывно понижаются, оставаясь параллельными друг другу. Следовательно, приращение срезки во времени ($\Delta S'$) равно приращению понижения за это время (S_0'') в скважине, вызывающей срезку.

Поэтому

$$\Delta S = \Delta S' + S_0''. \quad \text{(VI, 9)}$$

Величина $\Delta S'$ определяется по формуле (VI, 6), величина S''_0 — по формуле (VI, 4).

Приведем пример расчета понижения уровня воды в скважине при совместном применении гидравлического и гидродинамического методов.

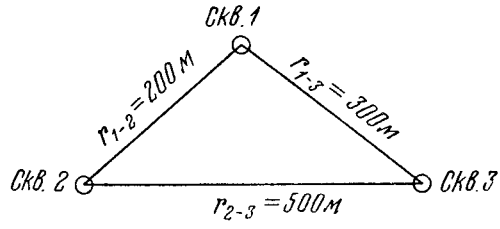


Рис. 35.

При разведке артезианских вод пробурено три разведочно-эксплуатационных скважины, расположенные в углах треугольника на расстояниях, показанных на схеме (рис. 35). Высота напора над кровлей 40 *м*. Проектный дебит каждой скважины 20 *л/сек*. Скважины последовательно опробованы опытными откачками в течение 3 суток с дебитом 15 *л/сек*.

В табл. 9 приведены данные о понижениях уровня воды в скважине 1 в процессе откачки.

Таблица 9

Время, *сутки*	Понижение, *м*
0,5	6,00
1,5	6,35
3,0	6,60

В табл. 10 приведены наблюденные понижения уровня воды (срезки, *м*) в скважине 1, вызванные откачками из скважин 2 и 3.

По кривой дебита эксплуатационному дебиту (20 *л/сек*) соответствует понижение $S_0' = 9{,}0$ *м*.

Определяем по формуле (VI, 5) понижение в скважине 1 на конец эксплуатационного периода, принятого $t_2 = 10\,000$ суток (около 27 лет) при работе этой скважины как одиночной.

$$S_0 = 9{,}0 + \frac{20}{15}(6{,}60 - 6{,}35)\frac{\lg 10\,000 - \lg 3}{\lg 3 - \lg 1{,}5} = 12{,}92 \text{ м}.$$

Таблица 10

Время от начала откачки, *сутки*	Понижения уровня, *м*			
	от работы скважины 2		от работы скважины 3	
	ΔZ_1	ΔZ_2	ΔZ_1	ΔZ_2
$t_1 = 1{,}5$	1,77	—	1,46	—
$t_2 = 3{,}0$	—	1,99	—	1,65

Срезки от работы скважин 2 и 3 определяем по формуле (VI, 8):

от работы скважины 2

$$\Delta S_2 = \frac{20}{15}\left[1{,}99 + (1{,}99 - 1{,}77)\frac{\lg 10\,000 - \lg 3}{\lg 3 - \lg 1{,}5}\right] = 6{,}10 \text{ м};$$

от работы скважины 3

$$\Delta S_3 = \frac{20}{15}\left[1{,}65 + (1{,}65 - 1{,}46)\frac{\lg 10\,000 - \lg 3}{\lg 3 - \lg 1{,}5}\right] = 5{,}16 \text{ м}.$$

Общее понижение в скважине 1 определяем по формуле (VI, 1) как сумму понижения в этой скважине при работе ее как одиночной и срезок уровня, вызванных эксплуатацией скважин 2 и 3.

$$S = S_0 + \Delta S_2 + \Delta S_3 = 12{,}92 + 6{,}10 + 5{,}16 = 24{,}18 \text{ м}.$$

Рассчитанное понижение (около 24—25 *м*) меньше напора над кровлей (40 *м*), т. е. в течение эксплуатации осушения пласта не произойдет.

Если сделать аналогичные расчеты для $t_э = 36\,500$ суток (100 лет), то величина понижения в скважине 1 окажется 25,84 *м*, т. е. возрастёт лишь на

$$\frac{25{,}84 - 24{,}18}{24{,}18} \cdot 100 = 6{,}9\%.$$

Таким же образом могут быть рассчитаны понижения уровней в скважинах 2 и 3.

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПО АНАЛОГИИ

Ориентировочное суждение об эксплуатационных запасах подземных вод, отвечающее требованиям к их оценке по низким категориям запасов (C_1, C_2), можно получить по аналогии с другими, более детально изученными участками, в частности, по которым были утверждены запасы по промышленным категориям (А, В). Исключительную ценность как аналог имеют также данные о работе крупных (групповых) водозаборов. Опыт эксплуатации таких водозаборов учитывает в совокупности влияние всех факторов, от которых зависят эксплуатационные запасы и, в ча-

стности, влияние фактора времени на понижение уровней воды в скважинах водозабора.

Следует подчеркнуть, что суждение по аналогии допустимо, если сопоставляемые участки однотипны по граничным условиям (тип контуров пласта, условия питания и др.), т. е. качественно сходны, а различия между участками только количественные (например, отличаются коэффициенты фильтрации, мощности водоносного пласта, напоры, расстояния до реки и т. п.).

При примерно равных площадях и числе скважин сопоставляемых участков понижения уровней воды в скважинах приближенно могут быть рассчитаны по следующим формулам:

для напорных вод

$$S_{II} = S_I \frac{Q_{II} k_I m_I}{Q_I k_{II} m_{II}}; \qquad \text{(VI, 10)}$$

для безнапорных вод

$$S_{II} = H_{II} - \sqrt{H_{II}^2 - S_I (2H_I - S_I) \frac{Q_{II} k_I}{Q_I k_{II}}}. \qquad \text{(VI, 11)}$$

Индексом I обозначены параметры, относящиеся к участку, который служит аналогом, а индексом II — параметры к участку, для которого дается оценка эксплуатационных запасов.

Формулы (VI, 10) и (VI, 11) отвечают условиям установившегося движения. Однако во многих случаях при эксплуатации водозаборов стабилизации уровней воды в скважинах не наступает вследствие расширения районной депрессионной воронки во времени или увеличения суммарного дебита водозабора по мере ввода новых скважин.

Если продолжительность эксплуатации водозабора, который предполагается использовать как аналог при оценке эксплуатационных запасов на новом участке, меньше срока, на который рассчитываются запасы, то к наблюдаемому понижению (S_I) при расчетах по формулам (VI, 10) и (VI, 11) должна быть прибавлена величина S_I'', выражающая увеличение понижений уровней воды за время от момента обследования водозабора до срока, на который рассчитываются эксплуатационные запасы. Это дополнительное понижение определяется по формуле:

$$S_I'' = \frac{Q_{ср}}{4\pi k_I m_I} (\ln t_э - \ln t_I), \qquad \text{(VI, 12)}$$

где $t_э$ — срок, на который рассчитываются запасы;

t_I — время в течение которого водозабор работает с более или менее постоянным расходом $Q_{ср}$;

$t_э$ и t_I — считаются от момента, когда водозабор введен в действие.

Если расход водозабора за последнее время существенно увеличился, то за величину $Q_{ср}$ можно приближенно принимать сред-

ний расход за последние 1—2 года эксплуатации. Величиной t_1 в формуле (VI, 2) в этом случае считается некоторое приведенное время, определяемое из выражения:

$$t_1 = \frac{V}{Q_{ср}},$$

где V — общий объем воды, откачанный из водозабора за все время его эксплуатации.

В этом случае определение понижения S_1'' по формуле (VI, 12) дает некоторый «запас», оправданный ориентировочным характером расчета. При расчете эксплуатационных запасов в формулы (VI, 10) и (VI, 11) вместо величины S_1 следует подставить сумму S_1+S_1''.

Работа водозабора, который предполагается использовать как аналог, должна быть тщательно изучена. По архивным данным устанавливается дебит водозабора по годам и строится соответствующий график расхода воды во времени. На большинстве крупных водозаборов такие данные имеются. Сложнее обстоит дело с данными о понижениях уровней воды в скважинах водозабора. Они имеются лишь на отдельных водозаборах, на которых были своевременно организованы наблюдения за режимом подземных вод. На момент обследования водозабора эти данные можно получить непосредственным измерением динамических уровней воды в скважинах. При этом отметки статических уровней должны быть установлены по архивным материалам. Величиной S_1 в формулах (VI, 10) и (VI, 11) следует считать величину понижения в центральной части депрессии.

Водопроводимость пласта (k_1m_1) можно определить по формуле Дюпюи, рассматривая участок водозабора как большой колодец и задаваясь вероятной величиной радиуса влияния. Более точно это определение может быть выполнено, если вне участка водозабора по 2—3 лучам заложены наблюдательные скважины (расчеты k_1m_1 в этом случае производятся также по формуле Дюпюи по парам наблюдательных скважин).

Определение проводимости пласта на новом участке, для которого определяются эксплуатационные запасы, производится по данным опытных откачек.

Глава VII

БАЛАНСОВЫЕ МЕТОДЫ

При расчетах балансовыми методами принимается, что эксплуатационные запасы являются обеспеченными при соблюдении следующего равенства:

$$Q_э = Q_е + \frac{a \cdot V_е}{t}, \qquad \text{(VII, 1)}$$

где $Q_э$ — эксплуатационные запасы;
$Q_е$ — естественные ресурсы подземных вод;
V — естественные запасы подземных вод;
a — доля использования естественных запасов;
t — время, на которое рассчитываются эксплуатационные запасы.

Из формулы (VII, 1) вытекает, что эксплуатационные запасы обеспечены на неограниченно долгий срок использования ($t \to \infty$), если они не превышают естественные ресурсы подземных вод. Коэффициент использования естественных запасов (a) обычно принимают в пределах 0,3—0,5.

Балансовыми методами нельзя определить понижений в скважинах водозабора, так как убыль воды при эксплуатации относится усередненно ко всему балансовому району, а не к участку водозабора. Поэтому балансовые методы применяются только в сочетании с гидравлическими или гидродинамическими методами.

Дебит водозабора и восполнение запасов при применении балансовых методов рассчитываются отдельно и независимо, требуется лишь получение доказательств равенства (баланса) этих величин, что и принимается за критерий обеспеченности эксплуатационных запасов.

Для сопоставления дебита водозабора с естественными запасами и обеспеченностью их восполнения необходимо знать контуры распространения водоносного горизонта и области, в пределах которой линии токов подземных вод при эксплуатации будут направлены к водозабору. Если эта область охватывает весь водоносный горизонт, то границы площади распространения горизонта являются одновременно контурами балансового района. Такими условиями характеризуются, например, небольшие арте-

зианские бассейны подземных вод горноскладчатых структур, конуса выноса, аллювиальные отложения «сухих» долин, заложенных в непроницаемых коренных породах. Если область питания водозабора меньше площади распространения водоносного горизонта, то установление границ балансового района является достаточно условным.

ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Естественные запасы подземных вод — это объем воды в порах и трещинах водоносного пласта, способной вытекать под действием силы тяжести (гравитационная вода).

Естественные запасы артезианских вод в течение длительного времени остаются практически постоянными. Запасы грунтовых вод, имеющих более тесную связь с атмосферой и поверхностными водами суши, изменяются в течение года и за многолетний период в зависимости от метеорологических и гидрологических факторов, формирующих запасы этих вод. Поэтому, как это показал М. Е. Альтовский, необходимо различать максимальные запасы (при наиболее высоком положении зеркала грунтовых вод), минимальные (при наиболее низком положении зеркала), средние, а также запасы различной обеспеченности в том смысле, в каком этим понятием пользуются гидрологи.

Как известно, естественные запасы (V_e) подземных вод рассчитываются по формуле:

$$V_e = \mu \cdot V_0, \qquad \text{(VII, 2)}$$

где V_0 — объем водоносного пласта.

Определение объема водоносного пласта обычно не встречает затруднений, так как при гидрогеологических исследованиях можно установить его распространение и мощность. Правильность оценки естественных запасов подземных вод в основном зависит от точности определения водоотдачи.

Определение водоотдачи пород является трудной задачей и отсутствие ее удовлетворительного решения является главным препятствием при оценке естественных запасов подземных вод.

Существующие методы определения водоотдачи горных пород подразделяются на:

1) лабораторные;
2) основанные на наблюдениях за режимом грунтовых вод;
3) основанные на опытных откачках.

Лабораторные методы применимы только для определения водоотдачи песков, при этом нарушение естественной структуры песка при загрузке его в лабораторный прибор может существенно искажать результаты определения.

Водоотдача может быть определена по данным наблюдений за режимом грунтовых вод с достаточной для практики точностью,

если расход подземных вод выражается не через коэффициенты фильтрации горных пород, а определяется непосредственным измерением (Биндеман, 1952). Для периода (обычно зимнего), когда питание грунтовых вод практически прекращается и происходит сработка их естественных запасов, водоотдача может быть определена по уравнению:

$$\mu = \frac{Q_e t}{\Delta V_0}, \qquad \text{(VII, 3)}$$

где Q_e — средний расход подземного потока в зоне разгрузки за время t;

ΔV_0 — объем пласта, осушенного за это время.

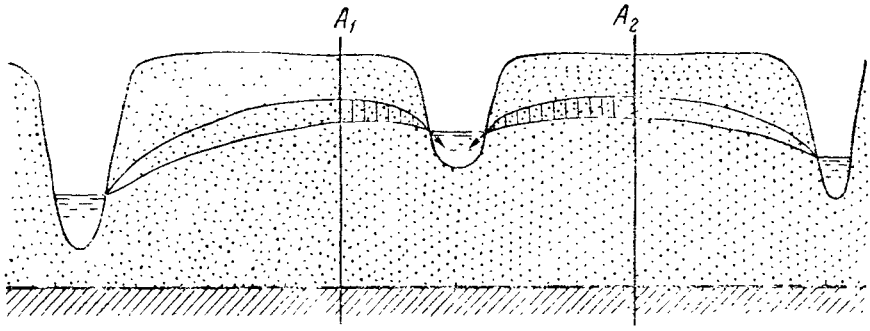


Рис. 36.

Величина ΔV_0 определяется по данным о понижении зеркала грунтовых вод, для чего должны быть организованы наблюдения за их режимом в области распространения водоносного горизонта. Площадь, в пределах которой определяется величина ΔV_0, ограничивается водоразделами (A_1 и A_2) грунтовых вод (рис. 36).

В тех случаях, когда водоупорное ложе подземного потока лежит выше уровня рек и поток разгружается источниками, выходящими в склонах, расход Q_e может быть установлен непосредственно замерами дебитов источников. Если подземный поток выходит в реку, то об этой величине можно судить по увеличению расхода реки на участке выклинивания подземного потока. Для этого выше и ниже участка реки, к которому направлен подземный сток, оборудуются гидрометрические створы, на которых ведутся систематические наблюдения за расходом реки. Разность расходов реки на этих створах, усередненная за время t, выражает величину Q_e. Следует отметить, что более или менее надежные данные можно получить только в тех случаях, когда приращение расхода реки соизмеримо с ее расходом.

Описанный метод имеет известные преимущества по сравнению с методом Г. Н. Каменского (1943), которым было предложено, пользуясь уравнением неустановившегося движения грунтовых вод

в конечных разностях, определять водоотдачу на балансовом участке в период, когда питание грунтовых вод прекращается. В теоретическом отношении этот метод достаточно обоснован, однако на практике он может приводить к существенным ошибкам, так как в формулу, которой пользуются для расчетов водоотдачи, коэффициенты фильтрации и градиенты потока входят в разностях. Это предъявляет требования к точности определения коэффициентов фильтрации по расчетному профилю балансового участка. Даже относительно небольшие изменения коэффициента фильтрации по профилю по отношению к его средней величине могут вызывать весьма существенную погрешность в определении водоотдачи. Поэтому применение расчетов в конечных разностях для определения водоотдачи может производиться лишь в случаях достаточно однородного пласта, причем коэффициенты фильтрации должны быть определены опытными откачками в пределах верхнего и нижнего элемента балансового участка.

П. А. Киселевым (1951) и Н. А. Плотниковым (1955) рекомендуется определять водоотдачу по скорости движения индикатора, загружаемого в наблюдательную скважину и улавливаемого в скважине, из которой производится откачка. Однако в этих условиях определяется не водоотдача (емкостная характеристика), а активная пористость породы (динамическая характеристика), что не одно и то же.

При фильтрации воды движение происходит через все сечение пор, за исключением оболочек прочно связанной воды. При осушении пласта в стыках зерен породы и особенно в мелкозернистых прослойках, всегда имеющихся в осадочных породах в силу условий их образования, остается капиллярно подвешенная вода, которая затем частично расходуется испарением. Поэтому водоотдача песчаных пород, как это было показано лабораторными опытами многих исследователей, значительно меньше активной пористости.

Основным недостатком метода индикаторов является отсутствие учета неоднородности пласта. Индикатор распространяется по отдельным слоям и прослоям с повышенной водопроницаемостью и по крупным трещинам во много раз быстрее, чем в «среднем» по пласту, что не соответствует основной предпосылке, принятой при выводе формулы водоотдачи. Особенно это относится к трещиноватым породам.

Как известно из гидравлики, скорость движения воды в трещине породы пропорциональна квадрату ее ширины. Следовательно, в трещине шириной 1 *мм* вода будет двигаться в 100 раз быстрее, чем в трещине шириной 0,1 *мм*. Между тем объем воды, вытекание которой характеризует водоотдачу породы, в сравниваемых трещинах отличается только в 10 раз. Таким образом, возможная ошибка при определении водоотдачи по скорости фильтрации настолько значительна, что индикаторный метод не может рассматриваться даже как приближенный.

Наиболее достоверно величина водоотдачи горных пород может быть определена на основе наблюдений за понижением уровней воды в наблюдательных скважинах при опытных откачках (Биндеман, 1962). Этот метод, имеющий строгое теоретическое обоснование, очень прост и доступен. Он применим для условий безнапорных вод, где эксплуатация водозаборов приводит к осушению пласта, т. е. к сработке естественных запасов. Наблюдения за уровнем воды в процессе откачки производятся в двух скважинах, расположенных по лучу и находящихся на расстояниях r_1 (ближняя скважина) и r_2 (дальняя скважина) от центральной, понижения уровней в которых обозначим соответственно S_1 и S_2.

Если производить откачку с постоянным дебитом Q, то понижение уровня воды в наблюдательной скважине через некоторое время t от начала откачки составит:

$$S_1 = \frac{Q}{4\pi k h_{ср}} \ln \frac{2{,}25 k h_{ср} t}{\mu r_1^2}, \qquad \text{(VII, 4)}$$

где $h_{ср}$ — средняя мощность водоносного пласта.

Из формулы (VII, 4) водоотдача (μ) выражается:

$$\ln \mu = \ln \frac{2{,}25 k h_{ср} t}{r_1^2} - \frac{4\pi k h_{ср} S_1}{Q}. \qquad \text{(VII, 5)}$$

Как отмечалось, при откачке из скважины с постоянным расходом образуется область, концентрически распространяющаяся с течением времени, в которой уровни подземных вод понижаются с той же скоростью, что и в скважине, из которой производится откачка. Поэтому разность уровней в наблюдательных скважинах через некоторое время оказывается постоянной, хотя движение продолжает оставаться неустановившимся, поскольку уровни понижаются. При этом типе движения, названным В. Н. Щелкачевым квазистационарным, применимы формулы установившейся фильтрации. Выражая величину $Kh_{ср}$ по формуле Дюпюи, получим:

$$Kh_{ср} = \frac{Q \cdot \ln \frac{r^2}{r_1}}{2\pi (S_1 - S_2)}. \qquad \text{(VII, 6)}$$

Подставив выражение $Kh_{ср}$ в формулу (VII, 5), после соответствующих алгебраических преобразований получим:

$$\mu = 0{,}824 \frac{Qt}{r_1^2 (S_1 - S_2)} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{\frac{2S_1}{S_1 - S_2}} \cdot \lg \frac{r_2}{r_1}. \qquad \text{(VII, 7)}$$

Обозначив безразмерную величину

$$0{,}824 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{\frac{2S_1}{S_1 - S_2}} \cdot \lg \frac{r_2}{r_1} = \beta,$$

формулу (VII, 7) можно представить в следующем, удобном для расчетов виде:

$$\mu = \beta \frac{Qt}{r_1^2 (S_1 - S_2)}. \qquad \text{(VII, 8)}$$

Коэффициент β для различных значений $\frac{r_2}{r_1}$ определяется по графику, по оси абсцисс которого отложены значения $\frac{S_1}{S_1 - S_2}$ (рис. 37).

Предположим, что требуется определить водоотдачу песчаников по данным опытной откачки: $Q = 1000$ *м³/сутки*; $t = 2$ суток; наблюдательные скважины располагаются на расстояниях $r_1 = 25$ *м* и $r_2 = 50$ *м*; понижения уровней воды в них на конец откачки соответственно были $S_1 = 1{,}5$ *м* и $S_2 = 0{,}9$ *м*. Вычисляем $\frac{S_1}{S_1 - S_2} = \frac{1{,}5}{1{,}5 - 0{,}9} = 2{,}5$. По графику (см. рис. 37) при $\frac{r_2}{r_1} = \frac{50}{25} = 2$ находим соответствующее значение $\beta = 0{,}0077$.

По формуле (VII, 8) имеем:

$$\mu = 0{,}0077 \frac{1000 \cdot 2}{25^2 (1{,}5 - 0{,}9)} = 0{,}04, \text{ т. е. } 4\%.$$

Водоотдача пород является емкостной характеристикой породы, поэтому она не может зависеть ни от мощности пласта, ни от коэффициента фильтрации, что ясно показывают формулы (VII, 7) и (VII, 8), в которые указанные параметры не входят. Следовательно, любые погрешности, которые могли бы возникнуть при определении коэффициента фильтрации и средней мощности водоносного пласта, изменяющихся во времени вследствие осушения пласта, не влияют на величину водоотдачи, если ее определять по изложенному выше методу. Все величины, входящие в формулы (VII, 7) и (VII, 8) — расстояния до наблюдательных скважин, расход скважины, понижение уровней в скважинах и время опытной откачки — определяются очень просто и достаточно точно.

Предлагаемый метод определения основывается на том же уравнении (IV, 6), которым пользуются для расчета коэффициента уровнепроводности (a_y) с последующим вычислением μ из выражения

$$\mu = \frac{K h_{ср}}{a_y}. \qquad \text{(VII, 9)}$$

В формуле (VII, 9) все величины считаются постоянными. В действительности же средняя мощность водоносного пласта при откачке в условиях безнапорных вод непрерывно изменяется (уменьшается) по мере осушения пласта. Следовательно, в формуле (IV, 6), по которой определяется понижение уровня воды в зоне влияния откачки, величина $h_{ср}$ сама зависит от понижения, а не является константой.

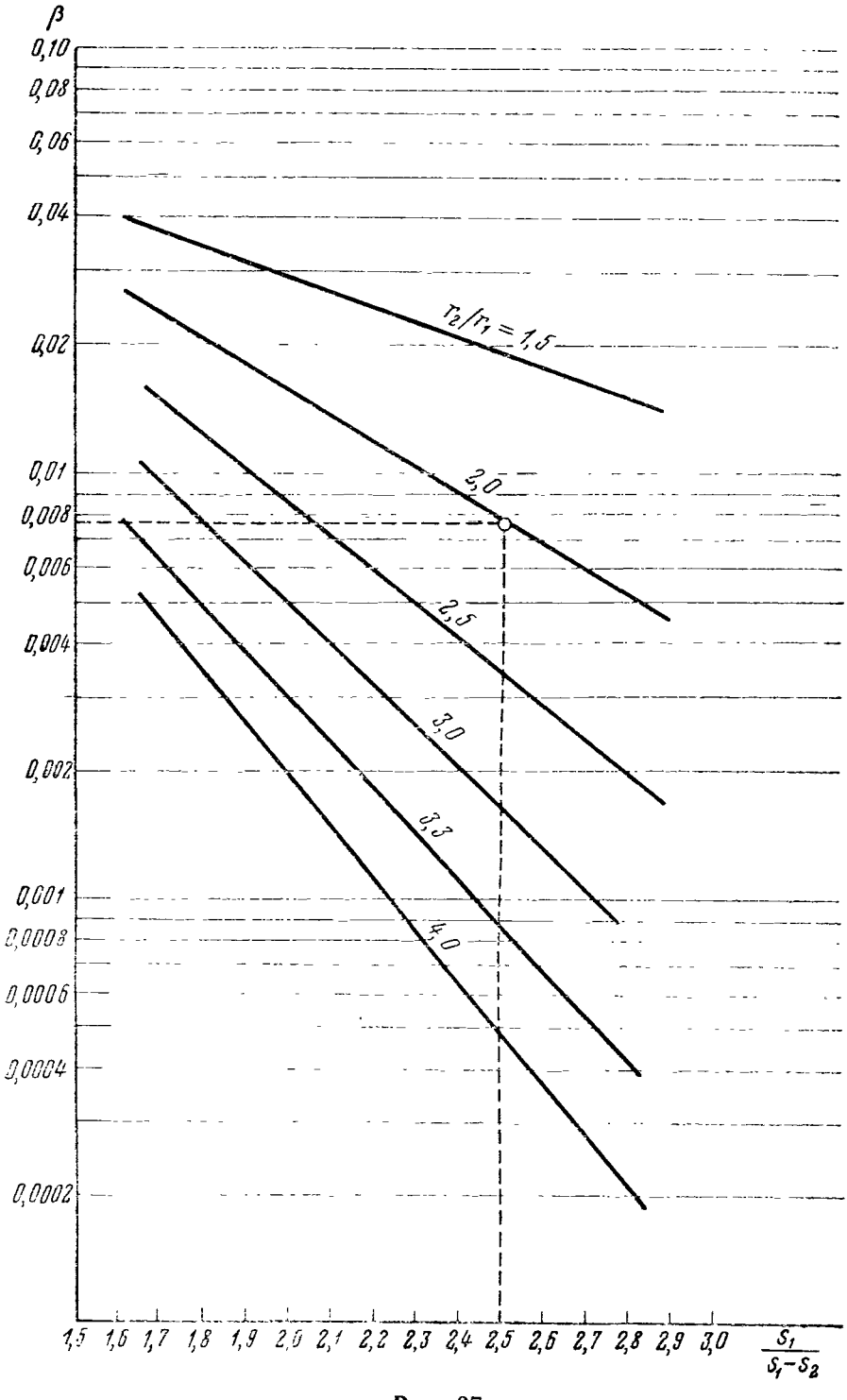

β
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,01
0,008
0,006
0,004
0,002
0,001
0,0008
0,0006
0,0004
0,0002
r2/r1 = 1,5
2,0
2,5
3,0
3,3
4,0
1,5 1,6 1,7 1,8 1,9 2,0 2,1 2,2 2,3 2,4 2,5 2,6 2,7 2,8 2,9 3,0
S1/(S1−S2)

Рис. 37.

Допущение постоянства средней мощности водоносного пласта при определении коэффициента уровнепроводности вполне оправдано, так как при расчетах понижений уровней воды в скважинах параметр a_y входит в формулу под знаком логарифма, а потому и неточность его определения не имеет практического значения.

Иначе обстоит дело при определении коэффициента водоотдачи, который входит в формулу (VII, 5) под знаком логарифма. При расчете μ даже небольшие погрешности в значении $h_{ср}$ весьма ощутимо сказываются на величине μ. Поскольку естественные запасы подземных вод прямо пропорциональны водоотдаче (VII, 2), то ошибка в ее определении приводит к такой же ошибке при оценке этих запасов.

Что касается выбора расстояний до наблюдательных скважин и продолжительности откачки, то, учитывая размеры зоны, где движение подземных вод к скважине можно рассматривать как квазистационарное, расстояние до дальней наблюдательной скважины (r_2) при длительности опытной откачки около 2 суток можно принимать для песчаных пород 25—30 *м*, а для скальных (трещиноватых) — 50—70 *м*; ближняя наблюдательная скважина располагается примерно посередине между дальней и центральной скважинами. В трещиноватых породах желательно иметь два луча наблюдательных скважин: один в направлении преобладающей трещиноватости, другой перпендикулярно ему. Откачку следует производить с постоянным расходом, не допуская изменений дебита более 10% от средней величины. Откачку можно прекратить, когда разность понижений уровней воды (но не сами понижения) в наблюдательных скважинах стабилизуется во времени.

ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Естественные ресурсы подземных вод можно оценить либо по питанию водоносного горизонта инфильтрацией атмосферных осадков и поглощению воды из рек, либо по расходу потока подземных вод. Последний метод имеет несомненное преимущество по следующим соображениям.

Питание водоносного горизонта осуществляется не только инфильтрацией атмосферных осадков и поглощением поверхностного стока, но и путем перетекания из выше- и нижерасположенных водоносных горизонтов через относительно слабопроницаемые слои вследствие разности напоров в водоносных горизонтах. В области распространения водоносного горизонта может происходить не только его пополнение, но и расходование воды как путем перетекания в смежные водоносные горизонты, так и путем испарения. По приведенным соображениям оценка ресурсов подземных вод по величине питания атмосферными осадками или по поглощению поверхностного стока может приводить в одних слу-

чаях к занижению естественных ресурсов, в других — к их завышению.

При оценке естественных ресурсов по расходу потока подземных вод питание и расходование подземных вод в области, расположенной выше створа, в котором определяется расход, учитывается по совокупности, интегрированно.

Расход естественного потока, измеренный в зоне разгрузки подземных вод, характеризует естественные ресурсы водоносного горизонта в целом. Отношение этого расхода (в *л/сек*) к площади распространения водоносного горизонта (в *км*^{2}) называется модулем подземного стока.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ПОТОКА ПО ДАННЫМ О КОЭФФИЦИЕНТЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДОНОСНОГО ПЛАСТА

Как известно, расход подземного потока выражается формулой:

$$Q_e = \frac{k_1\omega_1 + k_2\omega_2}{2} \cdot I, \qquad \text{(VII, 10)}$$

где k_1, k_2 — средние коэффициенты фильтрации пласта в двух поперечных сечениях потока, расположенных перпендикулярно направлению движения вод, т. е. по линиям равного напора (гидроизогипсам или гидроизопьезам);

ω_1 и ω_2 — площади этих сечений;

I — средний напорный градиент (уклон) потока между расчетными сечениями.

$$I = \frac{\Delta H}{l}, \qquad \text{(VII, 11)}$$

где ΔH — разность напоров подземных вод в расчетных сечениях;

l — расстояние между этими сечениями.

Если коэффициенты фильтрации пород, мощности водоносного пласта и уклоны потока существенно изменяются по его фронту, то общее сечение потока следует разделить на элементы, в пределах которых характеристики можно принять более или менее постоянными. Расчет расхода производится по формуле (VII, 10) для каждого выделенного элемента, а затем элементарные расходы суммируются.

Определение коэффициентов фильтрации производится методом опытных откачек. Напорные градиенты потока устанавливаются по карте гидроизогипс и гидроизопьез. Площади поперечного сечения потока определяются планиметрированием гидрогеологических разрезов. Если значения коэффициентов фильтрации изменяются по вертикали, то по каждой из этих вертикалей вычисляется средневзвешенное значение коэффициента, которое и принимается в дальнейших расчетах.

Наиболее точным является расчет расхода потока по профилям водопроницаемости, т. е. при выделении на профиле изолиниями средних значений коэффициентов фильтрации для определенных зон. Этот метод целесообразно применять, например, для оценки расхода потока в аллювиальных отложениях, характеризующихся вертикальной зональностью.

Если пласт однородный и мощность его изменяется в небольших пределах, то:

$$Q_e = kh_{ср}BI, \qquad \text{(VII, 12)}$$

где $h_{ср}$ — средняя мощность потока;
B — ширина фронта потока.

Расход потока прямо пропорционален коэффициенту фильтрации, значение которого, как показывает практика, существенно изменяется на весьма коротких расстояниях. В связи с этим расчет потока по формулам (VII, 10) и (VII, 12) может иметь достаточную для практики точность лишь для отдельных сравнительно небольших участков, на которых произведены детальные разведочные работы и опытные откачки.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ПОТОКА ПО СКОРОСТИ ЕГО ДВИЖЕНИЯ

Скорость движения воды в порах или трещинах породы определяется путем введения индикатора в скважину и наблюдений за изменением его концентрации в другой скважине, расположенной ниже по потоку.

Расход потоков определяется по формуле:

$$Q_e = \frac{U}{P_0}\omega, \qquad \text{(VII, 13)}$$

где P_0 — активная пористость (или коэффициент трещиноватости) породы;
ω — площадь поперечного сечения потока;
U — средняя скорость движения воды в порах или трещинах породы.

Активная пористость рыхлых пород равна разности между пористостью породы и содержанием в ней связанной (пленочной) воды. С увеличением крупности частиц породы одновременно уменьшается как пористость (вследствие возрастания неоднородности состава), так и содержание связанной воды (вследствие уменьшения удельной поверхности частиц), поэтому активная пористость в песках разной крупности и гравелистых отложений отличается мало и находится обычно в пределах 0,30—0,35.

Коэффициент трещиноватости (скважности) скальных пород изменяется в весьма широких пределах (от тысячных долей единицы до 0,10).

Определение расхода потока по скорости его движения имеет ряд недостатков, основными из которых являются следующие:

1) для трещиноватых пород этот метод неприменим, так как многообразие размеров трещин и неравномерность скоростей движения воды в них не позволяют рассматривать движение индикатора как характеризующее среднюю скорость движения воды в пласте, что необходимо для применения формулы (VII, 13);

2) участок, на котором производится опыт, имеет размеры несоизмеримо малые с размерами фронта потока (ширина потока, несущего индикатор между загрузочной скважиной и наблюдательной, меньше двух диаметров скважины, т. е. практически не превосходит 0,5 *м*);

3) при движении индикатора, особенно при малых скоростях фильтрации, существенное значение имеют сорбция и диффузия индикатора;

4) скорость движения подземных вод в большинстве случаев незначительна (например, в песке при коэффициенте фильтрации 15 *м/сутки* при характерных для подземных вод уклонах подземного потока порядка 0,001 и активной пористости 0,30 скорость движения подземных вод составляет: $U=\frac{15}{0{,}30}\cdot 0{,}001=0{,}05$ *м/сутки*).

Таким образом, если скважины расположить даже весьма близко друг от друга (например, на расстоянии 1 *м*), опыт должен продолжаться не менее 20 суток, причем характеристика расхода потока была бы получена для крайне малого участка.

Следовательно, определять естественный расход потока подземных вод по скорости их движения нецелесообразно.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ИЗМЕРЕНИЕМ РАСХОДА ИХ ПОТОКА В ЗОНЕ ДРЕНИРОВАНИЯ

В тех случаях, когда в речных долинах водоупорное ложе потока подземных вод располагается выше горизонта реки или этот поток разгружается источниками на контакте со слабопроницаемыми породами (например, в нижней части конусов выноса), расход потока можно определить непосредственными измерениями дебитов источников. Наблюдения за режимом источников следует производить не менее года.

В тех случаях, когда водоносный горизонт разгружается непосредственно в реку, для определения естественных ресурсов подземных вод можно применять гидрологические методы, которые имеют две модификации:

а) расчет по разности расходов реки, дренирующих водоносный горизонт, замеренных на двух гидрометрических створах;

б) расчет по методу расчленения гидрографа реки.

Определение расхода подземного потока по результатам наблюдений за расходом рек на двух гидрометрических створах основано на том, что в периоды отсутствия поверхностного стока

(например, зимой) приращение расхода на участке, ограниченном гидрометрическими створами, равно величине подземного питания рек, т. е. расходу подземного потока.

Этот метод имеет следующие ограничения: 1) питание реки со стороны берега, противоположного тому, для которого определяется расход подземного потока, отсутствует или может быть установлено независимо; 2) река дренирует только один водоносный горизонт; 3) питание происходит из другого горизонта (например, нижележащего), то оно может быть принято на участке между створами постоянным; 4) приращение расхода реки на участке, ограниченном гидрометрическими створами, значительно и отличается от расхода реки в верхнем створе на величину, в несколько раз превышающую возможную погрешность измерения расхода реки гидрометрическими приборами.

Указанный метод особенно применим в карстовых районах, где сток небольших рек и ручьев формируется в основном за счет выклинивания подземного потока. При этом ввиду значительных изменений расхода подземных вод во времени наблюдения за стоком рек должны быть достаточно длительными (не менее года, а для характеристики многолетних изменений, обычно подчиняющихся периодической закономерности, в течение нескольких лет). Одновременно желательно вести наблюдения за режимом карстовых вод по скважинам, расположенным в области распространения водоносного горизонта.

Определение естественных ресурсов грунтовых вод на основе анализа гидрографа реки было впервые применено в 1887—1888 гг. В. Г. Шуховым, Е. К. Кнорре и К. Э. Лембке при работах по проектированию Московского городского водопровода в Мытищах. В летнюю засуху и зимой, когда река питается за счет дренирования подземных вод, ее расход выражает естественные ресурсы подземных вод. Очевидно, что таким образом определяется минимальная величина этих ресурсов, так как в периоды прекращения питания грунтовых вод их сток в реки меньше, чем в среднем за год.

Определению естественных ресурсов подземных вод по величине питания рек посвящен ряд исследований, обзор которых содержится в работах Б. И. Куделина (1949, 1960). Им предложено анализировать гидрограф реки с привлечением данных по режиму грунтовых вод в прибрежной зоне, т. е. решать задачу оценки естественных ресурсов подземных вод комплексным методом. Приращение расхода на том или ином участке в меженный период характеризует расход подземных вод только в этот период. Имея данные об изменениях мощностей потока и градиентов по наблюдениям за режимом грунтовых вод, можно определить величину подземного стока в другие периоды года. Во время паводков величина подземного стока может иметь отрицательное значение, так как в прибрежной зоне образуется уклон подземного потока от реки в глубь берега.

Основное достоинство метода Б. И. Куделина заключается в том, что расход потока подземных вод, выражающий их естественные ресурсы, определяется непосредственно, а не через коэффициент фильтрации водоносного пласта. Возможные ошибки при определении расхода реки обычно не превосходят 5—10%, в то время как при выборе среднего значения коэффициента фильтрации или величины инфильтрации для большого района можно ошибиться в несколько раз. Однако, если в районе имеется несколько водоносных горизонтов, то отнесение величины подземного стока к тому или иному водоносному горизонту является весьма условным, особенно в тех случаях, когда разветвленная система притоков реки дренирует более высоко расположенные горизонты, часто маломощные и не представляющие интереса для водоснабжения.

Метод Б. И. Куделина в основном применяется для региональной оценки естественных ресурсов подземных вод, так как дает некоторую усредненную для большой площади величину их питания, и поэтому является с этой точки зрения весьма ценным. Для определения естественных ресурсов на отдельных участках водоносного горизонта (что рассматривается в нашей работе) использовать этот метод, как правило, не представляется возможным, так как размеры зоны влияния водозабора обычно несоизмеримо малы по сравнению с площадью, для которой этим методом определяется величина естественных ресурсов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ВЕЛИЧИНЕ ПИТАНИЯ ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ

Если водоносный горизонт получает питание инфильтрацией атмосферных осадков, то его естественные ресурсы выражаются:

$$Q_e = WF, \qquad \text{(VII, 14)}$$

где W — инфильтрация атмосферных осадков на единицу площади зеркала водоносного горизонта в единицу времени;
F — площадь области питания водоносного горизонта, определяемая по гидрогеологической карте.

Непосредственное определение величины W производится в лизиметрах. Однако распространение лизиметрических наблюдений на всю область питания может быть сделано только очень условно, так как поглощение атмосферных осадков, зависит от целого ряда факторов: микрорельефа (во впадинах инфильтрации значительно больше, чем на возвышениях рельефа), растительности, характера почвенного покрова и глубины залегания грунтовых вод. Покровные образования часто представлены суглинками, на границе которых с подстилающими их более проницаемыми породами могут образовываться капиллярноподвешенные воды, затем испаряющиеся.

Длительность лизиметрических наблюдений не укладывается в обычные сроки изысканий, между тем только многолетние наблюдения, проведенные при этом в различных гидрогеологических, геоморфологических и геоботанических условиях, могут дать более или менее надежные результаты. Поэтому вполне естественно, что лизиметрические методы не нашли применения в практике изысканий, производящихся для оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

Другим методом определения величины инфильтрации являются расчеты по формулам установившегося и неустановившегося движения грунтовых вод, предложенные Г. Н. Каменским (1943).

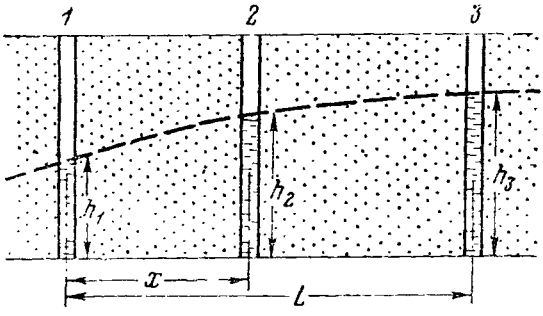


Рис. 38.

Если известны уровни воды в трех скважинах, расположенных по направлению потока грунтовых вод, то в условиях установившегося движения

$$W = \frac{k}{L-x}\left(\frac{h_2^2 - h_1^2}{x} - \frac{h_3^2 - h_1^2}{L}\right); \quad \text{(VII, 15)}$$

обозначения на рис. 38.

Если скважины расположены на равных расстояниях, т. е. $x = \frac{L}{2}$, то

$$W = \frac{k}{2x^2}(2h_2^2 - h_1^2 - h_3^2). \quad \text{(VII, 16)}$$

Перепишем это выражение в следующем виде:

$$Wx = k\frac{h_2^2 - h_1^2}{2x} - k\frac{h_3^2 - h_2^2}{2x}. \quad \text{(VII, 17)}$$

Левая часть уравнения (VII, 17) выражает количество воды, поступающей в единицу времени путем инфильтрации на поверхность грунтовых вод в пределах участка длиной x. Правая часть уравнения представляет собой разность расхода притекающих к балансовому участку и оттекающих от него подземных вод.

Формула (VII, 17) соответствует условию однородности пласта. В случае неоднородности пласта в горизонтальном направлении она должна быть записана следующим образом:

$$Wx = k_{\text{I}}\frac{h_2^2 - h_1^2}{2x} - k_{\text{II}}\frac{h_3^2 - h_2^2}{2x}, \quad \text{(VII, 18)}$$

где k_{I} — коэффициент фильтрации пласта на участке скважин 1 и 2;

k_{II} — то же на участке скважин 2 и 3.

Величина инфильтрации, если ее определять по формуле (VII, 18), пропорциональна разности расходов, поэтому для ее расчета требуется весьма высокая точность определения коэффициентов фильтрации, что может быть показано на примере.

Допустим, что в скважинах, находящихся на расстоянии $x=100$ *м* друг от друга, превышения уровней грунтовых вод над водоупором выражаются: $h_1=9{,}2$ *м*; $h_2=10{,}0$ *м*; $h_3=11{,}0$ *м*. Коэффициенты фильтрации $k_I=15$ *м/сутки*, $k_{II}=10$ *м/сутки* (эти значения удовлетворяют уравнению кривой депрессии). Расчет по формуле (VII, 18) дает величину инфильтрации: $W=0{,}001$ *м/сутки*, т. е. 365 *мм/год*.

Если произвести такой же расчет по формуле (VII, 16) при среднем значении коэффициента фильтрации $k=\frac{k_I+k_{II}}{2}=$ $=12{,}5$ *м/сутки*, то получим $W=-0{,}0035$ *м/сутки*. На основании этого можно было бы ошибочно заключить, что водоносный горизонт не только лишен инфильтрационного питания, а, наоборот, с его поверхности происходит убыль воды путем испарения, выражающаяся величиной 1,27 *м/год*.

Среднее значение коэффициента фильтрации (12,5 *м/сутки*) в рассмотренном примере отличается от крайних значений (10 и 15 *м/сутки*) только на 20%, что лежит, вообще говоря, в пределах точности определения этого коэффициента даже при хорошо проведенных опытных откачках. Это показывает, что даже сравнительно небольшие и трудно учитываемые на практике изменения проницаемости пласта оказывают огромное влияние на определяемую величину питания грунтовых вод (W) и могут приводить не только к неточным, но и к абсурдным выводам. Поэтому применять формулу установившегося движения подземных вод для расчетов их питания атмосферными осадками рекомендовать нельзя.

Наблюдения за режимом грунтовых вод позволяют применять для расчета W формулы неустановившегося движения, в конечных разностях предложенные Г. Н. Каменским (1943). В этом случае возможная ошибка от незнания или недостаточно точного учета неоднородности пласта при определении W менее существенна, чем при расчетах по формуле установившегося движения.

Величина W определяется по формуле:

$$W=\frac{\mu\,\Delta h}{\Delta t}-\frac{k}{2\Delta x^2}(h_1^2+h_3^2-2h_2^2), \qquad \text{(VII, 19)}$$

где Δh — изменение уровня, происходящее за отрезок времени Δt;

Δx — расстояния между сечениями 1—2 и 2—3.

Остальные обозначения те же, что в формуле (VII, 16).

Представим формулу (VII, 19) в развернутом виде при различных коэффициентах фильтрации на участках 1—2 ($k=k_I$) и 2—3 ($k=k_{II}$):

$$W=\frac{\mu\Delta h}{\Delta t}+\frac{1}{\Delta x}\left(k_1\frac{h_2^2-h_1^2}{2\Delta x}-k_{11}\frac{h_3^2-h_2^2}{2\Delta x}\right). \qquad \text{(VII, 20)}$$

Выражение в скобках в формуле (VII, 20) представляет собой разность расходов воды, оттекающей от балансового участка и притекающей к нему. В отличие от формулы установившегося движения эта разность при неустановившемся движении входит в формулу не множителем, а слагаемым. Абсолютное значение первого слагаемого в формуле (VII, 20) в периоды резкого повышения уровня грунтовых вод значительно больше, чем второго. Поэтому неточность определения коэффициентов фильтрации пласта в этих условиях на определяемую величину питания грунтовых вод влияет меньше. Основное значение, как это ясно из формулы (VII, 20), имеет точность определения водоотдачи (μ).

Повышение уровня грунтовых вод происходит в основном после снеготаяния и может рассматриваться как мера величины питания. К этому выводу можно прийти, если в формуле (VII, 20) в соответствии с высказанными соображениями, считать второе слагаемое равным нулю. В этом случае

$$W=\frac{\mu\Delta h}{\Delta t}, \qquad \text{(VII, 21)}$$

где Δh — наблюдаемое повышение уровня грунтовых вод после снеготаяния за время Δt.

Расчет инфильтрации по формуле (VII, 21) дает несколько преуменьшенное значение величины W, так как не учитывает понижение, связанное с оттоком воды в направлении к естественным дренам — рекам, озерам и т. п. Величину оттока можно приблизительно учесть, если считать его таким же, как и в предшествующий зимний период. При этом условии расчет инфильтрации следует производить по формуле:

$$W=\mu\frac{\Delta h+\Delta z}{\Delta t}, \qquad \text{(VII, 22)}$$

где Δz — величина, на которую уровень грунтовых вод снизился за время Δt за счет оттока по водоносному пласту.

Величина Δz может быть определена по графику режима грунтовых вод (рис. 39). Линия снижения уровня за время t_0, равное времени повышения уровня грунтовых вод, должна быть продолжена до точки, соответствующей максимуму уровня. Величина Δz выражается длиной ab.

При пользовании предлагаемым методом необходимо учитывать следующие соображения.

Повышение уровня грунтовых вод зависит не только от количества просочившейся воды, но и от разности притока и оттока воды в рассматриваемом сечении водоносного пласта. Если бы

депрессионная кривая была прямой линией, т. е. разность притока и оттока была равна нулю, то было бы совершенно безразлично, в каком сечении определять величину инфильтрации. В действительности депрессионная кривая в условиях инфильтрации является выпуклой кривой (эллипсом), поэтому в каждом сечении отток из данного элемента к расположенному ниже по потоку больше, чем приток к нему из вышерасположенного элемента. Чем ближе к реке, дренирующей грунтовые воды, тем больше разность этих расходов и тем меньше при прочих равных условиях повышение уровня под влиянием инфильтрации.

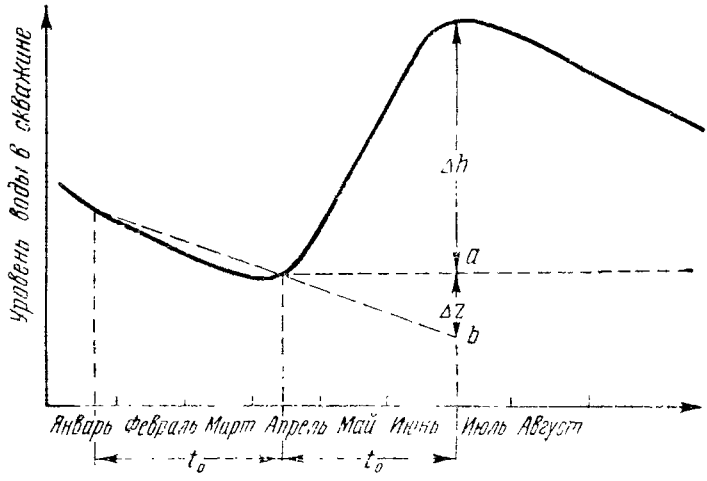


Рис. 39.

На водораздельном участке грунтовых вод повышение их уровня под влиянием инфильтрации достигает максимума, так как разность притока и оттока близка к нулю (поверхность вод почти горизонтальная).

Повышение уровня грунтовых вод зависит от глубины их залегания от поверхности земли, которая при весьма близком залегании лимитирует его повышение. Как отмечалось автором (1960), на некоторой глубине повышение уровня грунтовых вод под влиянием инфильтрации достигает максимума, а затем по мере увеличения глубины амплитуды колебаний уменьшаются вследствие регулирующей роли зоны аэрации. Амплитуда колебаний характеризует питание при такой глубине залегания, где ее величина является максимальной.

Исходя из этих соображений, рекомендуется определять величину питания водоносного горизонта при соблюдении следующих условий:

а) на участках, где поверхность грунтовых вод близка к горизонтальной, т. е. вдали от рек;

б) при глубинах залегания грунтовых вод в конце зимнего периода порядка 2—4 *м*.

Величина инфильтрационного питания грунтовых вод по изложенной методике всегда будет определена с некоторым преуменьшением, т. е. восполнение запасов грунтовых вод оценивается достаточно осторожно. Действительно: 1) поверхность грунтовых вод никогда не бывает идеально горизонтальной; 2) наблюденное повышение уровня может и не оказаться максимальным; 3) отток грунтовых вод в период повышения уровня всегда несколько больше оттока в предвесенний период, т. е. величина Δz определяется с некоторым занижением.

Если режим грунтовых вод характеризуется не только весенним подъемом, но и повышениями, связанными с инфильтрацией дождевых осадков, то для каждого периода подъема уровня грунтовых вод должны быть произведены аналогичные расчеты, а затем величины $(\Delta h+\Delta z)$ просуммированы. Среднегодовая величина инфильтрации может быть определена по формуле:

$$W=\mu\frac{\Sigma(\Delta h+\Delta z)}{365}\ м/сутки. \qquad \text{(VII, 23)}$$

Толщина слоя воды, просачивающейся в водоносный горизонт в течение года (y), выражается:

$$y=1000\mu\Sigma(\Delta h+\Delta z)\ мм. \qquad \text{(VII, 24)}$$

В формулах (VII, 23) и (VII, 24) величины Δh и Δz выражены в метрах.

В некоторых случаях (например, для сопоставления подземного и поверхностного стоков) целесообразно выражать величину питания подземных вод модулем подземного стока:

$$M_{п}=0{,}0317y, \qquad \text{(VII, 25)}$$

где $M_{п}$ — модуль подземного стока с 1 $км^2$ в $л/сек$.

Пример расчета величины питания грунтовых вод за годичный период. На рис. 40 приведен график колебаний уровня грунтовых вод в наблюдательной скважине (район Ленинграда).

Водоносный горизонт приурочен к послеледниковым мелкозернистым пескам, глубина его залегания 1,5—2,0 $м$ от поверхности земли. Величина недостатка насыщения не определялась. Учитывая, что для мелкозернистых песков эта величина обычно находится в пределах 0,10—0,15, примем $\mu=0{,}12$. В течение года

Таблица 11

Периоды повышения уровня	Δt, *сутки*	$\Delta h+\Delta Z$, *м*	w, *м/сутки*
1/IV—5/V	20	0,90	0,0054
25/VII—20/VIII	25	0,35	0,0017
15/X—1/XI	15	0,30	0,0024

наблюдались три периода повышения уровня грунтовых вод: в апреле—мае, в июле—августе и во второй половине октября. На графике пунктиром показаны линии, характеризующие подземный сток в те периоды, по которым определены значения $\Delta h + \Delta z$. В табл. 11 приведены величины инфильтрации за эти периоды, определенные по формуле (VII, 22).

Таким образом, в период, следующий за снеготаянием, инфильтрация составляла 5,4 *мм/сутки,* во время летних дождей 1,7 *мм/сутки,* а осенью увеличилась до 2,4 *мм/сутки.*

Годовое питание грунтовых вод атмосферными осадками по формуле (VII, 24) составляет:

$$y = 10\,000 \cdot 12 (0{,}90 + 0{,}35 + 0{,}30) = 186 \text{ мм}.$$

Модуль подземного стока по формуле (VII, 25):

$$M_{\text{п}} = 0{,}0317 \cdot 186 = 5{,}9 \text{ л/сек с 1 км}^2.$$

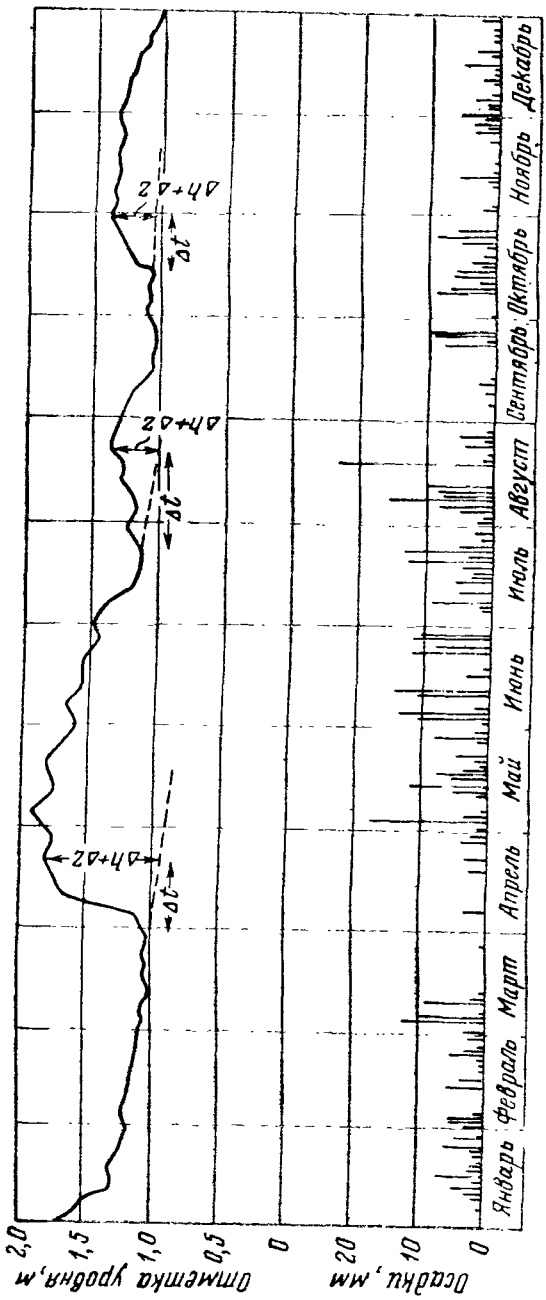


Рис. 40.

Изложенная методика определения инфильтрационного питания грунтовых вод дает возможность определить минимальное, т. е. гарантированное значение величины питания. В этом ее преимущество перед методом расчетов в конечных разностях, где в силу невозможности достаточно точно учесть фильтрационную неоднородность пласта, те или иные ошибки неизбежны, причем знак их остается неизвестным.

Другое преимущество этого метода заключается в том, что для оценки питания подземных вод можно использовать большое число наблюдательных скважин, размещенных на площади в раз-

личных условиях, тогда как расчеты в конечных разностях можно производить лишь на балансовых участках, на которых опытными откачками определены коэффициенты фильтрации.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ВЕЛИЧИНЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

Поглощение воды из рек в некоторых случаях является основным источником питания подземных вод. Особенно типичны в этом отношении районы распространения карста, в которых нередко реки полностью поглощаются. В горных долинах, на участках их расширения, происходит поглощение воды из реки, а затем мощный подрусловый поток вновь выходит в реку перед участком сужения долины.

Для определения величины питания подземных вод на реках, из которых, судя по общим гидрогеологическим условиям, возможно питание водоносного горизонта, оборудуется несколько гидрометрических створов. По разности расходов воды в этих створах можно судить о величине потерь воды из реки, т. е. о питании подземных вод.

Наблюдения на гидрометрических створах необходимо производить как минимум в течение года, а при большой изменчивости стока — в течение нескольких лет.

Глава VIII

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Основными параметрами водоносного пласта при оценке эксплуатационных запасов гидродинамическими методами являются коэффициенты фильтрации, пьезопроводности, уровнепроводности и приведенный радиус влияния. В некоторых случаях для напорных водоносных горизонтов целесообразно определять коэффициент водопроводимости, под которым понимается произведение коэффициента фильтрации на мощность водоносного пласта. Это возможно потому, что в расчетные формулы для напорных вод входит непосредственно произведение коэффициента фильтрации на мощность. В зависимости от гидрогеологических условий требуется определять в одних случаях только коэффициент фильтрации, в других — коэффициент фильтрации совместно с коэффициентом пьезопроводности или коэффициентом уровнепроводности.

Ограничиться только определением коэффициента фильтрации можно в случаях:

1) расположения водозабора вблизи водотоков и водоемов, с которыми подземные воды имеют гидравлическую связь, так как при этом условии довольно быстро наступает установившееся движение;

2) наличия безнапорных водоносных горизонтов, заключенных в песках, гравийно-галечных отложениях, проницаемых по порам, так как в этих породах водоотдача изменяется в небольших пределах и коэффициент уровнепроводности может быть вычислен непосредственно по формуле (IV, 2);

3) применения метода аналогии.

Коэффициент фильтрации совместно с коэффициентом уровнепроводности (пьезопроводности) определяется во всех случаях, если эксплуатация водозабора будет происходить в условиях неустановившегося движения и коэффициент уровнепроводности не может быть определен по формуле (IV, 2), т. е.: а) при эксплуатации водозабором напорного водоносного горизонта вдали от его границ (неограниченный пласт) или горизонта, ограниченного непроницаемыми контурами; б) при эксплуатации водозабором безнапорного водоносного горизонта, приуроченного к трещиноватым породам.

В некоторых случаях в напорных водоносных горизонтах, кроме указанных расчетных параметров, следует определять коэффициент перетекания. Определение этого коэффициента целесообразно тогда, когда расчеты по упругому режиму приводят к выводу о необеспеченности запасов, а литологическое строение слоистой толщи и соотношение напоров таково, что имеются основания предполагать возможность перетекания (например, если водоносные горизонты разделены маломощными слоями песчаных глин или трещиноватых мергелей, аргиллитов, особенно, если эти разделяющие слои выклиниваются и в них имеются так называемые «окна»). Кроме того, перетекание следует учитывать также в тех случаях, когда приток воды из другого водоносного пласта может существенно ухудшить качество воды намеченного к эксплуатации горизонта.

Следует также отметить, что так как перетекание приводит к установившемуся режиму, вместо коэффициента перетекания может быть непосредственно определен приведенный радиус влияния ($R_п$).

Наиболее точно эти параметры могут быть получены в результате проведения опытных работ — откачек и наблюдений за восстановлением уровня. По своему назначению откачки подразделяются на пробные, опытные и опытно-эксплуатационные.

Пробные откачки производятся для предварительной оценки водоносности вскрытого горизонта и качества подземных вод. Целью опытных откачек является:

1) установление зависимости дебита скважины от понижения уровня воды в ней (кривая дебита);

2) определение коэффициентов фильтрации и водопроводимости водоносных горизонтов;

3) определение коэффициента пьезопроводности или уровнепроводности;

4) определение приведенного радиуса влияния;

5) определение величин срезок уровня в пределах участка возможного расположения водозабора при совместной работе эксплуатационных скважин;

6) определение так называемого «внутреннего сопротивления», возникающего под влиянием фильтра скважины и процессов, протекающих в призабойной зоне.

Опытно-эксплуатационные откачки проводятся в особо сложных гидродинамических и гидрохимических условиях для определения возможных изменений динамического уровня и качества воды во времени. Такие откачки следует проводить при отсутствии постоянных источников восполнения.

Методика откачек (выбор типа откачки — одиночная или кустовая, количество и положение наблюдательных скважин, продолжительность откачек, количество понижений, их последовательность) определяются целевым назначением откачки, стадией проведения работ и гидрогеологическими условиями. Последние

определяют режим движения подземных вод при опытных откачках, в зависимости от особенностей которого назначаются основные методические положения проведения откачек.

РЕЖИМ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ОПЫТНЫХ ОТКАЧКАХ

Процесс развития депрессионной воронки во время опытной откачки является достаточно сложным, так как формирование депрессионной поверхности происходит под воздействием ряда факторов, важнейшими из которых являются осушение пласта (в безнапорных водах) или влияние упругого режима (в напорных водах). Однако даже при непродолжительных откачках с постоянным дебитом (порядка нескольких суток) в зоне, окружающей скважину, режим движения подземных вод приобретает квазистационарный характер, т. е. кривые депрессии перемещаются параллельно друг другу, а поэтому расчеты коэффициента фильтрации могут производиться по формулам установившегося движения.

Размеры зоны, в которой практически наступило квазистационарное состояние, зависят от литологического состава водовмещающих пород, гидравлического характера горизонта и продолжительности откачки.

Так, при продолжительности откачек 1—2 суток радиус этой зоны колеблется от 20 до 100 *м* в безнапорных водах и от 200 до 1500 *м* в водах напорных. При длительных откачках, которые производятся для прогноза понижений уровня в эксплуатационных скважинах во времени, размеры воронки депрессии становятся столь значительными, что в некоторых случаях на ее формирование начинают оказывать существенное влияние процессы перетекания из ниже- и вышележащих горизонтов и границы водоносного пласта в плане.

Процессы перетекания приводят к стабилизации понижения в центральных и наблюдательных скважинах, влияние же границ пласта может быть различным. Если скважина расположена близ реки, то происходит быстрая стабилизация уровня; при непроницаемом контуре, наоборот, скорость понижения уровня во времени возрастает.

Из анализа режима движения подземных вод при откачках ясно, что требование в любых гидрогеологических условиях производить откачку до установившегося дебита и понижения является совершенно необоснованным, так как во многих случаях стабилизация уровня при постоянном дебите или стабилизация дебита при постоянном уровне может произойти через десятки лет. Поэтому мнение о том, что откачку, которая была прекращена до стабилизации уровней, следует считать «некондиционной», ошибочно. Кроме того, нужно учитывать, что только откачка при неустановившемся режиме может дать обоснованные данные для прогноза развития депрессионной воронки во времени.

МЕТОДИКА ОТКАЧЕК

ПРОБНЫЕ ОТКАЧКИ

Из целевого назначения пробных откачек (предварительная оценка водоносности вскрытых горизонтов и качества воды) следует, что они проводятся для выбора водоносных горизонтов и участков для проведения разведочных работ. Эти откачки проводятся из одиночных скважин с одним понижением уровня на поисковой стадии и в некоторых случаях на стадии предварительной разведки. Продолжительность пробных откачек составляет 1—3 смены.

ОПЫТНЫЕ ОТКАЧКИ

Опытные откачки являются основным видом гидрогеологических работ, проводящихся на стадии предварительной и детальной разведки подземных вод. Опытные откачки подразделяются на откачки из одиночных скважин и кустовые. Последние обладают рядом преимуществ перед одиночными, так как позволяют исключить влияние фильтра скважины и призабойной зоны. Фильтр вносит дополнительное сопротивление, процессы суффозии в призабойной зоне могут привести к увеличению водопроницаемости, а процессы уплотнения грунта при бурении — к уменьшению водопроницаемости. Неучет этих факторов может существенно повлиять на величину определяемых параметров.

Поэтому, для решения большинства перечисленных выше задач целесообразнее проводить кустовые откачки. Исключение составляют только откачки, которые проводятся для определения зависимости между дебитом и понижением, а на стадии предварительной разведки — откачки для определения коэффициента фильтрации, так как на этой стадии не нужна большая точность в определении коэффициента фильтрации. В опубликованной литературе (Тененбаум, Гринбаум; 1965) имеются рекомендации об отказе от наблюдательных скважин при откачках, проводимых с целью определения коэффициента фильтрации. Однако эти рекомендации получены на основании анализа материалов очень небольшого количества откачек и не учитывают также, что кустовые откачки позволяют охарактеризовать коэффициент фильтрации на значительно большей площади, чем одиночные. Кроме того, следует иметь в виду, что, как показывает практика, правильный расчет коэффициента пьезопроводности, сопротивления фильтра скважины и призабойной зоны и срезки уровня при применении гидравлического метода оценки эксплуатационных запасов подземных вод можно произвести только при наличии наблюдательных скважин.

Таким образом, на стадии детальной разведки, как правило, должны проводиться кустовые откачки, причем, в качестве наблюдательных должны по возможности использоваться пробуренные

на участке разведочные и разведочно-эксплуатационные скважины. Особенно это относится к глубокозалегающим артезианским водоносным горизонтам, где бурение специальных наблюдательных скважин стоит очень дорого.

При проектировании наблюдательных скважин следует учитывать, что имеющиеся в литературе (Веригин, 1962) рекомендации о расположении наблюдательных скважин обязательно по лучам, нормальным к направлению потока или совпадающими с ним, являются неверными. Количество лучей и их положение определяется только степенью однородности водоносного горизонта, граничными условиями и схемой водозабора. В однородных пластах, когда водозаборы располагаются на большом удалении от границ водоносного горизонта, достаточно иметь один луч из 2—3 наблюдательных скважин, расположенных по линии заложения водозаборных скважин.

При расположении водозабора у реки расстояние между центральной и наблюдательной скважинами в луче, параллельном реке, не должно превышать расстояния от скважины до реки. Данные об изменении уровня в наблюдательных скважинах, расположенных на том же расстоянии до реки, что и центральная скважина, позволяют рассчитывать параметры без учета естественных колебаний уровня, так как амплитуда колебания в обеих скважинах одинаковая.

Второй луч наблюдательных скважин при разведке прибрежных водозаборов целесообразно расположить по направлению от водозабора к реке. Такое же направление луча желательно иметь и в том случае, если граница пласта представлена не рекой, а контактом с другими отложениями.

И, наконец, в трещиноватых породах, часто обладающих анизотропными фильтрационными свойствами, желательно иметь два луча наблюдательных скважин — по основному направлению трещиноватости и перпендикулярно этому направлению.

Расстояние между наблюдательными скважинами и продолжительность опытных откачек взаимосвязаны. Наблюдательные скважины следует располагать таким образом, чтобы они, во-первых, оказались в зоне квазистационарной фильтрации, что в значительной мере облегчает расчет гидрогеологических параметров, во-вторых, чтобы абсолютные величины понижений уровня в них были достаточно велики.

Если принять условие, что понижение в первой наблюдательной скважине должно составлять не менее 20%, а во второй не менее 10% от понижения в центральной скважине, то для назначения расстояний до наблюдательных скважин можно руководствоваться таблицей 12.

Расположение наблюдательных скважин на рекомендуемых расстояниях позволяет охарактеризовать сравнительно большую зону. Однако в тех случаях, когда понижение в центральной скважине невелико, а следовательно, и понижения в наблюдательных

Таблица 12

Породы	Воды	Максимальное расстояние, *м*	
		до наблюдательной скважины 1	до наблюдательной скважины 2
Мелко- и среднезернистые пески	Напорные	80	150
	Безнапорные	10	15
Крупнозернистые пески	Напорные	200	450
	Безнапорные	15	30
Гравийно-галечниковые отложения	Напорные	200	450
	Безнапорные	25	40
Трещиноватые породы	Напорные	80	150
	Безнапорные	30	50

скважинах и особенно их изменения во времени крайне малы, рекомендуется закладывать еще одну наблюдательную скважину в непосредственной близости от центральной на расстоянии 8—10 *м* в безнапорных горизонтах и 25—30 *м* напорных. В безнапорных водоносных горизонтах большой мощности в тех случаях, когда расстояния до наблюдательных скважин, приведенные в табл. 12, меньше величины мощности водоносного горизонта, для определения значения «внутреннего сопротивления» целесообразно иметь также наблюдательную скважину, расположенную от центральной на расстоянии, равном мощности горизонта. При рекомендованных расстояниях между скважинами опытную откачку для определения коэффициента фильтрации можно проводить в напорных водах в течение одних суток, а в безнапорных — в течение двух суток. Однако, если учесть возможную неоднородность пласта, продолжительность откачки следует несколько увеличить, приняв ее в безнапорных горизонтах трое—четверо суток, в напорных двое—трое суток. Для определения коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности) продолжительность откачки должна быть несколько увеличена, в связи с тем, что в этом случае необходимо иметь данные по изменению уровня во времени. Для получения данных для расчета коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности) откачку в напорных горизонтах следует проводить в течение трех—пяти суток, а в безнапорных пяти—десяти суток, при этом откачка может быть закончена раньше, если в течение одних—двух суток не будет происходить изменения уровня в скважинах при постоянном дебите.

Приведенная выше продолжительность откачек является ориентировочной. В каждом конкретном случае следует корректировать продолжительность опытных откачек, исходя из целевого назначения и режима движения подземных вод. Хорошим способом анализа является построение во время откачки графика зависимости $S=f(\lg t)$.

Откачка должна проводиться с постоянным максимальным для данного насоса дебитом. Во время откачки допускается от-

клонение от этого дебита не более чем на 10%. Насосное оборудование следует подбирать таким образом, чтобы обеспечивалось понижение в центральной скважине по крайней мере на 3—4 *м*.

Замеры уровней проводятся во время откачки первые два часа через 10 минут, последующие двенадцать часов через час и далее до конца откачки через два—три часа.

После окончания откачки обязательно должны быть проведены наблюдения за восстановлением уровня. Замеры уровня проводятся со следующими интервалами: первые пятнадцать минут через минуту, далее в течение часа через пять минут, затем через час.

Количество понижений уровня зависит от целевого назначения откачек. Опытные откачки с несколькими понижениями уровня следует проводить только в тех случаях, когда целью откачки является установление зависимости дебита скважины от понижения уровня в ней. Кроме того, откачку с двумя понижениями целесообразно проводить и для определения коэффициента фильтрации безнапорных водоносных горизонтов, приуроченных к трещиноватым породам в целях установления характера изменения фильтрационных свойств с глубиной. Однако это имеет смысл только в том случае, когда имеется возможность создать большее понижение, равное 40—50% мощности водоносного горизонта, и обеспечить достаточно значительную разницу в величинах понижений.

Откачки для установления зависимости между дебитом и понижением следует проводить на два понижения уровня, а в безнапорных водоносных горизонтах, приуроченных к трещиноватым породам, — некоторую часть откачек на три понижения уровня. К этому выводу автор пришел на основании анализа данных 50 опытных откачек, проведенных в самых разнообразных гидрогеологических условиях (артезианские бассейны платформенного типа и горноскладчатых областей, водоносные горизонты в отложениях речных долин, конусах выноса и пролювиальных шлейфах) с тремя понижениями уровня, при которых наблюдалась криволинейная зависимость между дебитом и понижением (Язвин, 1965). Отметим, что сопоставительные результаты расчетов дебитов по данным указанных откачек с двумя и тремя понижениями уровня при понижениях, в два-три раза превышающих понижения при опытных откачках, показали в абсолютном большинстве случаев расхождение не более 10%.

Аналогичные результаты получились и при проверочных расчетах, когда по данным двух понижений определялся дебит, соответствующий третьему понижению, и этот дебит сравнивался с фактическим.

Такие проверочные расчеты были сделаны для 25 откачек, в которых максимальное понижение в 1,5—2,0 раза превышало опытное. Расхождение между рассчитанным и фактическим дебитом в семи случаях не превысило 3%, в пяти — составило от 3 до

5%, в десяти — от 5 до 10%, в двух — 10—11% и только в одном случае — 23%. Интересно, что этот единственный случай приходится на мергельно-меловой безнапорный водоносный горизонт, т. е. на безнапорный горизонт в трещиноватых породах, где водопроводимость с глубиной уменьшается.

Использованное в анализе количество опытов (50 и 25) при полученном распределении отклонений показало, что в 90—97% случаев расхождение в определении дебитов при откачке с двумя понижениями по сравнению с откачкой с тремя понижениями составляет менее 10%.

Таким образом, приведенные выше цифры красноречиво говорят о том, что проведение откачек на три понижения уровня дает уточнения величин дебита в пределах точности гидрогеологических расчетов Поэтому для установления зависимости дебита от понижения необходимо и достаточно в большинстве случаев проводить откачку на два понижения уровня. Одно из понижений должно быть максимально возможным, второе не менее чем в два—три раза меньше максимально возможного и вместе с тем не менее одного метра. В случае, если при увеличении понижения будет наблюдаться увеличение удельного дебита, откачку на меньшем понижении следует повторить, предварительно добившись восстановления статического уровня.

Как отмечалось, при проведении откачек из безнапорных горизонтов в трещиноватых породах некоторое их количество следует проводить на три понижения для определения изменения характера трещиноватости с глубиной *.

Большое значение при проведении откачек с двумя—тремя понижениями имеет последовательность понижений. Откачку во всех случаях следует начинать с меньшего понижения. Это связано с тем, что при переходе от большего понижения уровня на меньшее происходит восстановление уровня, вызванное уменьшением дебита. В таких случаях наблюдается временная стабилизация уровня, вызванная уменьшением дебита, что в некоторых случаях приводит к совершенно неправильным выводам об установившемся режиме движения подземных вод.

ОПЫТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОТКАЧКИ

Опытно-эксплуатационные откачки из одной или нескольких скважин следует проводить только в сложных гидрогеологических условиях. В простых гидрогеологических условиях, которые могут быть легко представлены в виде расчетной схемы, прово-

* Мы специально подробно остановились на вопросе о количестве понижений, так как практика рассмотрения отчетов в ГКЗ показывает, что очень часто при изысканиях проводятся откачки с тремя понижениями уровня там, где это совсем не определяется целевым назначением откачек. Это приводит к излишним затратам государственных средств.

дить опытно-эксплуатационные откачки нецелесообразно. При проектировании опытно-эксплуатационных откачек в сложных гидрохимических условиях следует иметь в виду, что в большинстве случаев, даже при очень близком расположении контура минерализованных или загрязненных вод в плане от водозабора, время передвижения этого контура измеряется годами. Поэтому, опытно-эксплуатационные откачки с целью установления опытным путем возможного изменения качества подземных вод следует проводить только при наличии опасности подсоса минерализованных вод в вертикальном разрезе или в случае расположения водозабора в близком (несколько сотен метров) расстоянии от реки, несущей загрязненные воды. В этом случае по направлению от водозабора к реке должен быть пробурен ряд наблюдательных скважин. Опытно-эксплуатационные откачки должны проводиться с одним максимально возможным дебитом, близким к проектному. Продолжительность их составляет один—два, а иногда и несколько месяцев.

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИЛЬТРАЦИИ, ВОДОПРОВОДИМОСТИ, УРОВНЕПРОВОДНОСТИ И ПЬЕЗОПРОВОДНОСТИ

Расчеты коэффициента фильтрации могут проводиться по формулам как установившегося движения, так и по формулам неустановившейся фильтрации. Коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности) рассчитывается только по формулам неустановившейся фильтрации подземных вод.

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ПО ФОРМУЛАМ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ

В том случае, если в зоне расположения наблюдательных скважин наступил квазистационарный режим, коэффициент фильтрации можно определять по известным формулам Дюпюи для установившегося движения. При откачке из одиночной скважины в формуле Дюпюи за радиус влияния следует считать его приведенную величину, зависящую от времени.

Эти формулы для совершенных скважин следующие.

При напорных водах:

для центральной скважины

$$K = \frac{0{,}366Q \lg \frac{R_{\text{п}}}{r_0}}{mS_0}; \qquad \text{(VIII, 1)}$$

для центральной и наблюдательной скважин

$$K = \frac{0{,}366Q \lg \frac{r_1}{r_0}}{m(S_0 - S_1)}; \qquad \text{(VIII, 2)}$$

для двух наблюдательных скважин

$$K=\frac{0{,}366Q\lg\frac{r_2}{r_1}}{m(S_1-S_2)}. \qquad \text{(VIII, 3)}$$

При безнапорных водах:

для центральной скважины

$$K=\frac{0{,}73Q\lg\frac{R_п}{r_0}}{(2H-S_0)S_0}; \qquad \text{(VIII, 4)}$$

для центральной и наблюдательной скважин

$$K=\frac{0{,}73Q\lg\frac{r_1}{r_0}}{(2H-S_0-S_1)(S_0-S_1)}; \qquad \text{(VIII, 5)}$$

для двух наблюдательных скважин

$$K=\frac{0{,}73Q\lg\frac{r_2}{r_1}}{(2H-S_1-S_2)(S_1-S_2)}. \qquad \text{(VIII, 6)}$$

В приведенных формулах S_0, S_1, S_2 — понижение уровня соответственно в центральной и в первой и второй наблюдательных скважинах;

r_1 и r_2 — расстояние от первой и второй наблюдательных скважин до центральной.

При значениях $l/m>0{,}1$ (l — длина рабочей части фильтра, m — мощность водоносного горизонта), что при изысканиях для водоснабжения является наиболее частым случаем, формулы (VIII, 1—6) могут применяться и для несовершенных скважин. Для этого в них Н. Н. Веригиным (1962) введена поправка на несовершенство. В результате формулы приняли следующий вид.

При напорных водах:

для центральной скважины

$$K=\frac{0{,}366Q\left[\lg\frac{R_п}{r_0}+0{,}217\xi_0\right]}{mS_0}; \qquad \text{(VIII, 7)}$$

для центральной и наблюдательной скважин

$$K=\frac{0{,}366Q\left[\lg\frac{r_1}{r_0}+0{,}217(\xi_0-\xi_1)\right]}{m(S_0-S_1)}; \qquad \text{(VIII, 8)}$$

для двух наблюдательных скважин

$$K = \frac{0{,}366Q\left[\lg\frac{r_2}{r_1} + 0{,}217\,(\xi_1 - \xi_2)\right]}{m\,(S_1 - S_2)}. \qquad \text{(VIII, 9)}$$

При безнапорных водах:

для центральной скважины

$$K = \frac{0{,}73Q\left[\lg\frac{R_n}{r_0} + 0{,}217\xi_0\right]}{(2H - S_0)\,S_0}; \qquad \text{(VIII, 10)}$$

для центральной и наблюдательной скважин

$$K = \frac{0{,}73Q\left[\lg\frac{r_1}{r_0} + 0{,}217\,(\xi_0 - \xi_1)\right]}{(2H - S_0 - S_1)\,(S_0 - S_1)}; \qquad \text{(VIII, 11)}$$

для двух наблюдательных скважин

$$K = \frac{0{,}73Q\left[\lg\frac{r_2}{r_1} + 0{,}217\,(\xi_1 - \xi_2)\right]}{(2H - S_1 - S_2)\,(S_1 - S_2)}. \qquad \text{(VIII, 12)}$$

В формулах (VIII, 7—12) ξ_0, ξ_1, ξ_2 — величины фильтрационных сопротивлений, соответственно учитывающие несовершенство центральной, первой и второй наблюдательных скважин по степени вскрытия, а в центральной скважине также влияние конструкции фильтровой части и др.

Величина ξ_0 складывается из двух составляющих (ξ_0' и ξ_0''). ξ_0' — определяет несовершенство скважины по степени вскрытия, а ξ_0'' — влияние конструкции фильтровой части и других технических причин.

Величина ξ_0', ξ_1, ξ_2 находятся по таблице 13 в зависимости от отношения длины рабочей части фильтра центральной скважины (l) к мощности водоносного горизонта (m) и мощности водоносного горизонта к величине r. При определении ξ_0' величиной r следует считать радиус центральной скважины (r_0); при определении ξ_1 и ξ_2 — соответственно расстояния от первой и второй наблюдательной скважин до центральной (r_1 и r_2).

При определении величины ξ для безнапорных водоносных горизонтов мощность водоносного горизонта (H) уменьшается на половину понижения в центральной скважине. В том случае, если

Таблица 13

$\frac{l}{m}$	m/r									
	0,5	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,1	0,00391	0,122	2,04	10,4	24,3	42,8	53,8	69,5	79,6	90,9
0,3	0,00297	0,0908	1,29	4,79	9,2	14,5	17,7	21,8	24,9	28,2
0,5	0,00165	0,0494	0,656	2,26	4,21	6,5	7,86	9,64	11,0	12,4
0,7	0,000546	0,0167	0,237	0,879	1,69	2,67	3,24	4,01	4,58	5,19
0,9	0,000048	0,0015	0,0251	0,128	0,3	0,528	0,664	0,846	0,983	1,12

фильтр центральной скважины незатопленный, его длина (l) уменьшается на половину длины осушенной части фильтра.

Несовершенство наблюдательных скважин, если они расположены на расстояниях, примерно равных или превышающих мощность водоносного горизонта, очень незначительно и его можно не учитывать.

Приведенные в таблице 13 значения ξ используются при расположении рабочей части фильтра у кровли или подошвы пласта. При расположении фильтра внутри пласта величины ξ, как показано в работе Ф. М. Бочевера (1961), следует уменьшать при $l/m=0{,}3$ на 1,5, при $l/m=0{,}5$ на 0,7.

Величина ξ_0'' наиболее точно может быть рассчитана по данным кустовых откачек.

Приведенные выше формулы справедливы для неограниченных пластов. Однако, как показано Н. Н. Веригиным (1962), при рекомендованных расстояниях между центральной и наблюдательными скважинами эти формулы обеспечивают достаточную точность при определении коэффициента фильтрации и для полуограниченного пласта.

Как уже выше было указано, формулы (VIII, 7—12) применяются для расчетов коэффициентов фильтрации при $l/m>0{,}1$. Если отношение длины фильтра к мощности водоносного горизонта меньше 0,1, для расчета следует пользоваться формулами:

а) при расположении фильтра у кровли и подошвы пласта

$$K=\frac{0{,}366Q\lg\frac{1{,}47l}{r_0}}{lS_0}; \qquad \text{(VIII, 13)}$$

б) при расположении фильтра в средней части пласта

$$K=\frac{0{,}366Q\lg\frac{0{,}73l}{r_0}}{lS_0}. \qquad \text{(VIII, 14)}$$

Формулы (VIII, 13, 14) заимствованы из работы Н. Н. Веригина (1962). По его предложению для расчета коэффициента фильтрации в безнапорных горизонтах в случае незатопленного

фильтра длина фильтра должна быть уменьшена на половину понижения в скважине.

Следует сделать одно важное замечание по расчету коэффициента фильтрации. Обычно при расчетах коэффициента фильтрации по данным опытных откачек с несколькими понижениями уровня определяется средняя его величина (как среднеарифметическое из всех определений). Это совершенно неверно, так как различные коэффициенты фильтрации при разных понижениях получаются в связи с неодинаковыми значениями сопротивлений при движении воды в призабойной зоне и внутри скважины, а также из-за недоучета проявлений неустановившегося режима фильтрации.

Дело в том, что, если переход с одного понижения на другое происходит без восстановления уровня, на величину второго понижения накладываются процессы восстановления или дополнительного понижения, вызванного уменьшением или увеличением дебита. Кроме того, как правило, откачка при разных понижениях имеет различную продолжительность, а для расчета коэффициента фильтрации берется понижение в конце откачки, что дает несопоставимые результаты. Поэтому, для определения расчетного значения коэффициента фильтрации следует проводить сопоставительные расчеты по наблюдательным скважинам и по формулам неустановившейся фильтрации. При проведении одиночных откачек определение следует проводить по первому (меньшему) понижению. Учитывая точность замеров, следует добиваться, чтобы величина этого понижения была не меньше одного метра.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДОПРОВОДИМОСТИ, ПЬЕЗОПРОВОДНОСТИ И УРОВНЕПРОВОДНОСТИ ПО ФОРМУЛАМ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ

Методы определения коэффициентов фильтрации и пьезопроводности по данным опытных откачек при неустановившемся движении нашли широкое применение в нефтяной практике как в Советском Союзе, так и за рубежом. Эти методы, основанные на использовании формулы (IV, 6) для определения понижения уровня при работе скважины с постоянным дебитом, стали широко применяться при гидрогеологических исследованиях. Как было показано, эта формула применима при $\frac{r^2}{4at}<0{,}1$.

Для условий напорных вод формула (IV, 6) преобразуется следующим образом:

$$S=\frac{Q}{4\pi Km}\cdot\ln\frac{2{,}25a}{r^2}+\frac{Q}{4\pi Km}\ln t. \qquad \text{(VIII, 15)}$$

При переходе к десятичным логарифмам

$$S=\frac{0{,}183Q}{Km}\cdot\lg\frac{2{,}25a}{r^2}+\frac{0{,}183Q}{Km}\lg t. \qquad \text{(VIII, 16)}$$

Если принять

$$\frac{0{,}183Q}{Km} \cdot \lg \frac{2{,}25a}{r^2} = A; \qquad \text{(VIII, 17)}$$

$$\frac{0{,}183Q}{Km} = C, \qquad \text{(VIII, 18)}$$

то формула (VIII, 8) принимает следующий вид:

$$S = A + C \lg t, \qquad \text{(VIII, 19)}$$

т. е. зависимость $S=f(\lg t)$ выражается уравнением прямой линии.

Если на полулогарифмической бумаге построить график, на оси абсцисс которого откладывать логарифмы времени, а на оси ординат понижения уровня, то получим прямую с угловым коэффициентом C и с начальной ординатой A (рис. 41).

Коэффициент C определяется по формуле:

$$C = \frac{S_2 - S_1}{\lg t_2 - \lg t_1}. \qquad \text{(VIII, 20)}$$

Взяв значение A непосредственно с графика (см. рис. 41) и определив C по формуле (VIII, 20), можно рассчитать Km и a по формулам:

$$Km = \frac{0{,}183Q}{C}; \qquad \text{(VIII, 21)}$$

$$\lg a = 2 \lg r - 0{,}35 + \frac{A}{C}. \qquad \text{(VIII, 22)}$$

Если определения проводятся по центральной скважине, то в формуле (VIII, 22) величиной r следует считать радиус скважины; если же определения проводятся по наблюдательной скважине, то r — расстояние от центральной скважины до наблюдательной.

Определение коэффициентов фильтрации и уровнепроводности при опробовании безнапорных водоносных горизонтов выполняется так же, как и при опробовании напорных горизонтов, с той разницей, что вместо графика $S=f(\lg t)$ строится график $S(2H-S)=f(\lg t)$. Этот график также выражается прямой линией, уравнение которой имеет вид

$$S(2H - S) = A + C \lg t; \qquad \text{(VIII, 23)}$$

$$A = \frac{0{,}366Q}{K} \cdot \lg \frac{2{,}25a_y}{r^2}; \qquad \text{(VIII, 24)}$$

$$C = \frac{0{,}366Q}{K}. \qquad \text{(VIII, 25)}$$

Как и в напорных водах, величина A определяется длиной отрезка, отсекаемого на оси ординат (рис. 42). Коэффициент C определяется по формуле

$$C = \frac{S_2(2H - S_2) - S_1(2H - S_1)}{\lg t_2 - \lg t_1}. \qquad \text{(VIII, 26)}$$

Коэффициенты фильтрации и уровнепроводности могут быть рассчитаны при известных A и C по следующим формулам:

$$K = \frac{0{,}366Q}{C}; \qquad \text{(VIII, 27)}$$

$$\lg a_y = 2\lg r - 0{,}35 + \frac{A}{C}. \qquad \text{(VIII, 28)}$$

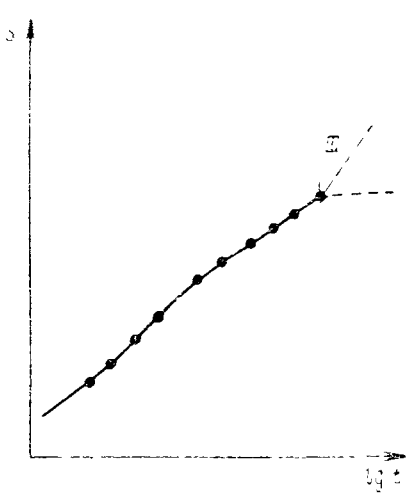


Рис. 41.

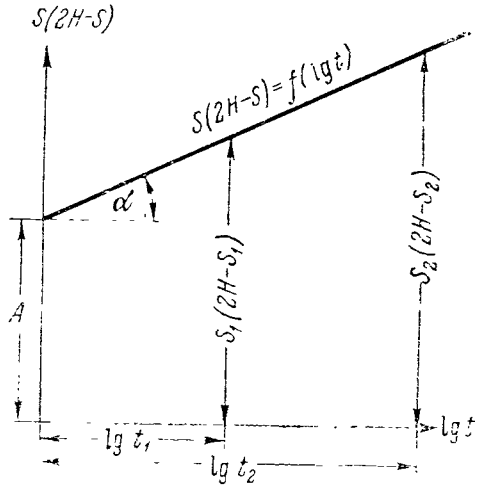


Рис. 42.

Если понижение уровня (S) составляет не более 15—20% от первоначальной мощности водоносного горизонта, то для безнапорных горизонтов можно определять параметры, как для напорных, пользуясь графиком $S = f(\lg t)$, с достаточной для практики точностью.

Приведенные выше формулы служат для определения параметров по совершенным скважинам. При обработке результатов опытных работ по несовершенным скважинам методика остается прежней, не меняются также формулы (VIII, 21) и (VIII, 27) для определения коэффициента водопроводимости и фильтрации. Несколько изменяются только формулы (VIII, 22) и (VIII, 28) для определения коэффициента пьезопроводности и уровнепроводности, которые принимают следующий вид:

$$\lg a = 2\lg r - 0{,}35 + \frac{A}{C} - 0{,}434\xi; \qquad \text{(VIII, 29)}$$

$$\lg a_y = 2\lg r - 0{,}35 + \frac{A}{C} - 0{,}434\xi, \qquad \text{(VIII, 30)}$$

где ξ — величина гидравлического сопротивления за счет несовершенства скважины.

Величина ξ определяется так же, как и при расчетах по формулам установившейся фильтрации. Для наблюдательных скважин она очень незначительна и практически ею можно пренебречь.

На графиках $S=f(\lg t)$ и $S(2H-S)=f(\lg t)$ обычно выделяются три участка (см. рис. 41). На первоначальном участке точки графика не ложатся на прямую линию. Этот период соответствует значению $r^2/4at>0{,}1$, когда логарифмическая зависимость между понижением уровня и временем не действует.

На участке (III) происходит отклонение графика от прямой линии, что может быть объяснено влиянием границ пласта. Поэтому для определения параметров следует использовать только среднюю прямолинейную часть графика (II), причем при разбросе точек нужно проводить усредненную прямую.

При построении графиков $S=f(\lg t)$ и $S(2H-S)=f(\lg t)$ понижение уровня и время принимаются в наиболее удобных размерных измерениях (понижение в метрах или сантиметрах, время в минутах, часах, сутках), необходимо только помнить, что размерность коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности) зависит от размерностей понижения и времени, выбранных при построении графика. Так, если понижение измерялось в метрах, а время в сутках, то размерность коэффициента пьезопроводности будет выражена в *м²/сутки*, если S в *м*, а t в *мин*, то a соответственно в *м²/мин*.

Размерность же величины Km, определяемой по формуле (VIII, 21) зависит только от размерности дебита. Так, если дебит измеряется в *м³/сутки*, то размерность коэффициента водопроводимости будет в *м²/сутки*, если дебит — в *м³/час*, то размерность коэффициента водопроводимости — в *м²/час*.

График $S=f(\lg t)$ можно строить в любом удобном масштабе. При обработке данных опытных откачек на практике может быть разнос точек. Поэтому при построении графика следует проводить усредненную прямую и для определения C брать значения S и $\lg t$ в двух любых точках полученной прямой.

Определение параметров следует проводить также по результатам наблюдений за восстановлением уровня. Необходимо отметить, что восстановление уровня часто дает более качественные результаты, чем откачка, так как в первый период откачки дебит обычно сильно колеблется из-за неравномерной работы насосного оборудования в пусковой период (особенно при откачке эрлифтом). Процесс восстановления не зависит от технических причин, а поэтому может дать более точные результаты.

При определении параметров по данным восстановления уровней методика обработки результатов аналогична изложенной выше

методике обработки данных откачки, только вместо понижений берутся повышения уровней, отсчитываемые от уровней, замеренных перед прекращением откачки. При этом за величину дебита принимается дебит перед прекращением откачки.

При определении параметров по данным наблюдений за восстановлением уровня необходимо, чтобы выдерживались следующие соотношения:

$$t_1 \leqslant 1{,}1t_0,$$
$$t_2 \leqslant 1{,}1t_1, \qquad \text{(VIII, 31)}$$

в которых t_0 — время от начала до прекращения откачки;

t_1 — момент времени, который может быть использован в качестве начальной точки при построении графика $S=f(\lg t)$;

t_2 — момент времени, который может быть принят в качестве конечной точки этого графика.

Величины t_1 и t_2 отсчитываются от начала откачки.

Эти соотношения следует выдерживать, так как в противном случае может быть допущена существенная ошибка из-за неучета процессов развития понижения после прекращения откачки.

Наиболее точные результаты дает определение коэффициентов пьезопроводности по наблюдательным скважинам. Эти скважины необходимо располагать на расстояниях, указанных в табл. 12, максимально используя, особенно в напорных горизонтах, разведочные скважины.

При кратковременных откачках при определении параметров по данным наблюдений за изменением уровня в удаленных скважинах, когда величина $r^2/4at>0{,}1$, для расчета параметров следует пользоваться непосредственно формулой (IV, 4), так как графоаналитический метод в этих случаях неприменим.

Если известно два значения понижения уровня (S_1 и S_2) на два соответствующих момента времени (t_1 и t_2) при откачке, проводимой с постоянным дебитом, то из формулы (IV, 4) можно получить следующее выражение

$$\frac{S_2}{S_1}=\frac{E_i\left(-\frac{r^2}{4at_2}\right)}{E_i\left(-\frac{r^2}{4at_1}\right)}. \qquad \text{(VIII, 32)}$$

Определение a производится подбором. Для этого нужно задаться несколькими значениями a и определить по формуле (VIII, 32) величину $\frac{S_2}{S_1}$ при заданных a. После этого строится график зависимости $\frac{S_2}{S_1}=f(a)$ и по графику определяется то значение a, которое соответствует отношению $\frac{S_2}{S_1}$, полученному по данным откачки.

Коэффициент водопроводимости при найденном значении a определяется по формуле:

$$Km = \frac{Q}{4\pi S_1} E_i\left(-\frac{r^2}{4at_1}\right). \qquad \text{(VIII, 33)}$$

Для удобства расчетов В. М. Шестаков предложил выбирать значения понижений уровней S_1 и S_2 на момент времени t_1 и t_2, отличающиеся друг от друга в α раз ($t_2 = \alpha t_1$), где:

$$\alpha = 1{,}5;\quad 2{,}0;\quad 2{,}5;\quad 3{,}0.$$

Для таких соотношений В. М. Шестаковым (1962) составлен график зависимости величины $\frac{S_2}{S_1}$ от величины λ, где

$$\lambda = \frac{r^2}{4at_1}. \qquad \text{(VIII, 34)}$$

Зная величину $\frac{S_2}{S_1}$, по графикам (рис. 43) можно определить «λ» и по формуле (VIII, 35) рассчитать коэффициент пьезопроводности:

$$a = \frac{r^2}{4\lambda t_1}. \qquad \text{(VIII, 35)}$$

Коэффициент водопроводимости определяется по формуле (VIII, 33).

Описанная методика определения коэффициентов фильтрации и пьезопроводности относится к исследованиям на вновь разведуемых участках. Во многих случаях в связи с задачами расширения действующих водозаборов необходимо проводить определения параметров на участках водозаборов, где многолетняя эксплуатация привела к практически установившемуся режиму.

В таких условиях останавливается одна из скважин водозабора, в которой ведутся наблюдения за восстановлением уровня. Наблюдения за уровнем ведутся и в других скважинах водозабора, которые должны работать с тем же дебитом, что и до организации наблюдений в опытной скважине. Повышение уровня отсчитывается от уровней, замеренных перед остановкой опытной скважины. Эти уровни условно принимаются за статические. При выборе скважин для опыта нужно убедиться, что их конструкция позволяет замерять в них динамические уровни и поддерживать постоянные дебиты. Сроки наблюдений и частота замеров такие же, как и при проведении опытов на вновь разведуемых участках. Не рекомендуется останавливать сразу несколько скважин, так как это сильно затруднит обработку результатов опыта.

Такие опыты проводятся и по другим скважинам водозабора, причем наиболее желательна остановка высокодебитных скважин.

Примеры расчета. Пример 1. Определить коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности по данным опытной откачки

из совершенной скважины при напорном водоносном пласте по данным табл. 14.

Откачка проводилась с постоянным дебитом $Q=1200$ *м³/сутки*; радиус центральной скважины $r_0=0{,}1$ *м*; расстояние до наблюдательной скважины $r=100$ *м*. Строится график зависимости $S_0=f(\lg t)$ и $S_1=f(\lg t)$. S_0 и S_1 выражены в метрах, t — в часах (рис. 44). С графика снимаются значения A: по центральной скважине 6,4; по наблюдательной скважине 0,9.

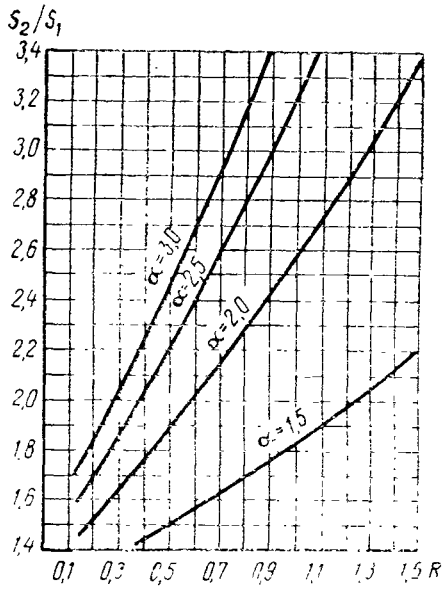


Рис. 43. График зависимости соотношения понижений уровня от коэффициента пьезопроводности

Определяем **C** по формуле (VIII, 20) по понижениям и времени для двух точек графика (*M* и *N* для центральной скважины и для точек M_1 и N_1 — для наблюдательной):

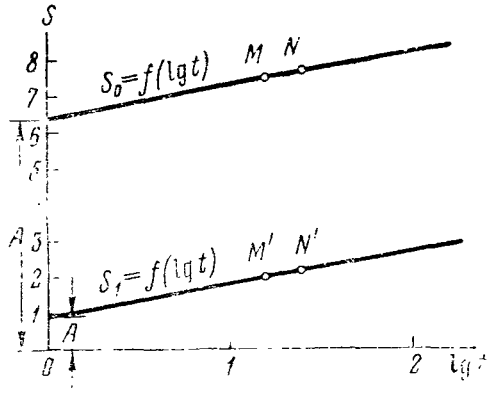


Рис. 44.

для центральной скважины

$$C=\frac{7{,}7-7{,}5}{1{,}4-1{,}2}=1;$$

для наблюдательной скважины

$$C=\frac{2{,}2-2{,}0}{1{,}4-1{,}2}=1.$$

Следовательно, и по центральной и по наблюдательной скважинам получены одинаковые значения параметра *C*.

По формулам (VIII, 21) и (VIII, 22) определяем коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности. Коэффициент водопроводимости: $Km=\frac{0{,}183\cdot 1200}{1{,}0}=220$ *м²/сутки*.

Коэффициент пьезопроводности:

Таблица 14

Время после начала откачки t, *час*	Понижение уровня в центральной скважине S_0, *м*	Понижение уровня в наблюдательной скважине S_1, *м*	Время после начала откачки t, *час*	Понижение уровня в центральной скважине S_0, *м*	Понижение уровня в наблюдательной скважине S_1, *м*
6	7,12	1,60	42	7,90	2,33
12	7,42	1,90	48	7,96	2,44
18	7,54	2,04	54	8,00	2,48
24	7,70	2,18	60	8,04	2,52
30	7,75	2,24	66	8,08	2,56
36	7,82	2,31	72	8,12	2,60

для наблюдательной скважины

$$\lg a = 2\lg 100 - 0{,}35 + \frac{0{,}9}{1{,}0} = 4{,}55;$$

$$a = 3{,}58 \cdot 10^4 \ м^2/час = 8{,}5 \cdot 10^5 \ м^2/сутки;$$

для центральной скважины

$$\lg a = 2\lg 0{,}1 - 0{,}35 + \frac{6{,}4}{1{,}0} = 4{,}05;$$

$$a = 1{,}12 \cdot 10^4 \ м^2/час = 2{,}7 \cdot 10^5 \ м^2/сутки.$$

Определение коэффициента пьезопроводности по центральной скважине вследствие возможного влияния призабойной зоны является менее надежным.

Пример 2. Определить коэффициенты фильтрации и уровнепроводности водоносных трещиноватых известняков.

Водоносный горизонт имеет свободную поверхность. Мощность водоносного горизонта 20 *м*. Опытная откачка проводилась с постоянным дебитом 1000 $м^3/сутки$. Уровни во время откачки замерялись в наблюдательной скважине, расположенной в 70 *м* от центральной.

Результаты откачки приведены в табл. 15.

Таблица 15

Время от начала откачки t, *сутки*	Понижение уровня в наблюдательной скважине S, *м*	Время от начала откачки t, *сутки*	Понижение уровня в наблюдательной скважине S, *м*
0,5	0,37	6	1,28
1	0,60	7	1,34
2	0,82	8	1,40
3	0,99	9	1,45
4	1,11	10	1,49
5	1,20		

Строим график $S(2H-S)=f(\lg t)$ (рис. 45).

Предварительно составляем вспомогательную табл. 16.

Использовав для обработки прямолинейную часть графика, определяем $A=20{,}5$.

По формуле (VIII, 26) в точках M и N:

$$C=\frac{57{,}5-38{,}4}{1{,}0-0{,}48}=36{,}6;$$

$$K=\frac{0{,}366Q}{C}=\frac{0{,}366\cdot 1000}{36{,}6}=$$

$$=10\ м/сутки;$$

$$\lg a_y=2\lg 70-0{,}35+$$

$$+\frac{20{,}5}{36{,}6}=3{,}90;$$

$$a_y=7943\ м^2/сутки\approx$$

$$\approx 8\cdot 10^3\ м^2/сутки.$$

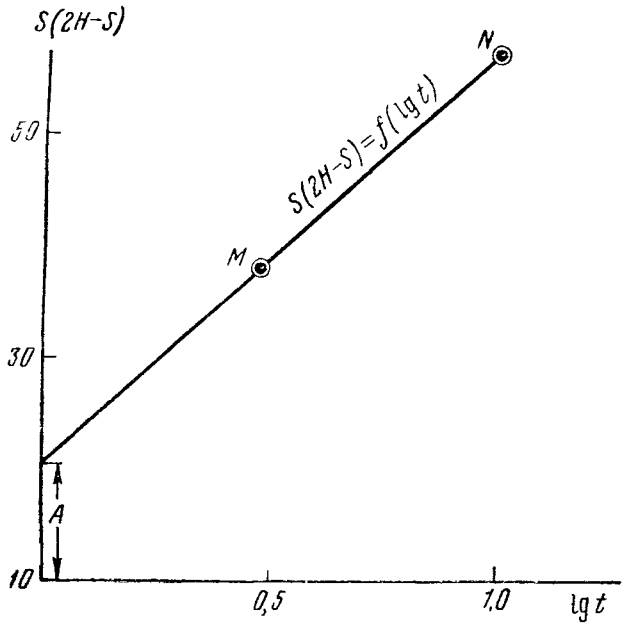


Рис. 45.

Приведенные выше формулы касались обработки данных опытных работ в случаях, когда откачка проводилась из одной скважины. На практике часто могут встретиться случаи, когда параметры требуется определить при совместной работе нескольких скважин (например, на действующих водозаборах, в которых одновременно включаются или останавливаются несколько скважин, или при проведении групповой откачки).

Таблица 16

t, *сутки*	S, *м*	$S(2H-S)$	$\lg t$
0,5	0,37	14,48	—0,3
1	0,60	23,6	0
2	0,82	32,0	0,3
3	0,99	38,4	0,48
4	1,11	43,0	0,6
5	1,20	46,5	0,7
6	1,28	49,3	0,78
7	1,34	51,9	0,845
8	1,40	54,0	0,90
9	1,45	55,8	0,954
10	1,49	57,5	1,00

Разберем случай групповой откачки из двух скважин, заложенных в напорном водоносном горизонте на расстоянии r друг от друга. Откачка из скважины 2 началась через время t_1 после начала откачки из скважины 1. Дебит скважины 1—Q_1, скважины 2—Q_2, радиусы скважин r_0. Наблюдения за понижением уровня проводились по скважине 1.

Составляем общее уравнение для понижения в скважине 1. Полное понижение S на момент времени $t(t>t_1)$ будет складываться из понижения, вызванного действием самой скважины 1 и срезки уровня, образованной в результате работы скважины 2.

$$S=\frac{Q_1}{4\pi Km}\ln\frac{2{,}25at}{r_0^2}+\frac{Q_2}{4\pi Km}\cdot\ln\frac{2{,}25a(t-t_1)}{r^2}. \qquad \text{(VIII, 36)}$$

Во второй член этой формулы подставляется время $(t—t_1)$, так как скважина 2 была включена через время t_1 после начала откачки из скважины 1.

Это уравнение можно преобразовать следующим образом:

$$S=\frac{Q_1}{4\pi Km}\left[\ln\frac{2{,}25a}{r_0^2}+\ln t+\alpha\ln\frac{2{,}25a}{r^2}+\alpha\ln(t-t_1)\right], \qquad \text{(VIII, 37)}$$

где

$$\alpha=\frac{Q_2}{Q_1} \qquad \text{(VIII, 38)}$$

или

$$S=\frac{Q_1}{4\pi Km}\left[\ln\frac{(2{,}25a)^{\alpha+1}}{r_0^2r^{2\alpha}}+\ln t(t-t_1)^{\alpha}\right]. \qquad \text{(VIII, 39)}$$

Заменив натуральные логарифмы десятичными, получим:

$$S=\frac{0{,}183Q_1}{Km}\left[\lg\frac{(2{,}25a)^{\alpha+1}}{r_0^2r^{2\alpha}}+\lg t(t-t_1)^{\alpha}\right]. \qquad \text{(VIII, 40)}$$

Если принять

$$\frac{0{,}183Q_1}{Km}\lg\frac{(2{,}25a)^{\alpha+1}}{r_0^2r^{2\alpha}}=A_1; \qquad \text{(VIII, 41)}$$

$$\frac{0{,}183Q_1}{Km}=C_1; \qquad \text{(VIII, 42)}$$

$$\lg t(t-t_1)^{\alpha}=\lg t_n, \qquad \text{(VIII, 43)}$$

получим зависимость, аналогичную зависимости при откачке из одиночной скважины:

$$S=A_1+C_1\lg t_n. \qquad \text{(VIII, 44)}$$

Поэтому определение параметров можно проводить так же, как и при одиночной откачке, графоаналитическим способом. Для этого строится график зависимости $S=f(\lg t_n)$, причем $\lg(t_n)$ рассчитывается по формуле (VIII, 43).

График представляет собой прямую линию с угловым коэффициентом, равным C_1, и отрезком A_1, отсекаемым на оси ординат. C_1 можно определить по формулам (VIII, 20) и (VIII, 26), подставляя в них $\lg t_n$ вместо $\lg t$. Зная A_1 и C_1, коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности рассчитывают по формулам, полученным из зависимостей (VIII, 41) и (VIII, 42):

$$Km = \frac{0{,}183Q_1}{C_1}; \qquad \text{(VIII, 45)}$$

$$\lg a = \frac{2\lg r_0 + 2\alpha \lg r - (\alpha + 1) \cdot 0{,}35 + \frac{A_1}{C_1}}{\alpha + 1}. \qquad \text{(VIII, 46)}$$

Пример 3. Определить коэффициенты водопроводимости (Km) и пьезопроводности по данным групповой откачки.

Откачка проводилась из двух скважин. Дебит скважины 1 1256 *м*^{3}*/сутки*, скважины 2, расположенной на расстоянии $r = 50$ *м* от скважины 1, 628 *м*^{3}*/ сутки*. Откачка из скважины 2 началась через 12 часов после начала откачки из скважины 1. Результаты наблюдений за уровнем по скважине 1 (радиус этой скважины $r_0 = 0{,}1$ *м*) приведены в табл. 17.

Таблица 17

Время от начала откачки t, *сутки*	Понижение уровня в скважине 1 S, *м*
1	11,12
2	11,75
3	12,07
5	12,47

Определяем $\lg t_n$ по формуле (VIII, 43):

$$\lg t_n = \lg t(t - t_1)^{\alpha} = \lg t + \alpha \lg (t - t_1).$$

Для расчета составляем табл. 18.

Таблица 18

S, *м*	t, *сутки*	t_1, *сутки*	$t - t_1$	$\lg t$	α	$\lg (t - t_1)$	$\alpha \lg (t - t_1)$	$\lg t_n$
11,12	1,0	0,5	0,5	0	0,5	−0,3	−0,15	−0,15
11,75	2,0	0,5	1,5	0,3	0,5	0,176	0,088	0,388
12,07	3,0	0,5	2,5	0,48	0,5	0,40	0,20	0,68
12,47	5,0	0,5	4,5	0,7	0,5	0,653	0,326	1,026

Строим график (рис. 46) зависимости $S = f(\lg t_n)$; из графика $A = 11{,}3$.

По формуле (VIII, 20) определяем C_1 в точках M и N:

$$C_1 = \frac{11{,}98 - 11{,}86}{0{,}6 - 0{,}5} = \frac{0{,}12}{0{,}1} = 1{,}2.$$

Определяем коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности по формулам (VIII, 45) и (VIII, 46):

$$Km = \frac{0{,}183 \cdot 1256}{1{,}2} = 192 \ м^2/сутки;$$

$$\lg a = \frac{2\lg 0{,}1 + 2 \cdot 0{,}5 \lg 50 - 1{,}5 \cdot 0{,}35 + \frac{11{,}3}{1{,}2}}{1{,}5} = 5{,}74;$$

$$a = 5{,}5 \cdot 10^5 \ м^2/сутки.$$

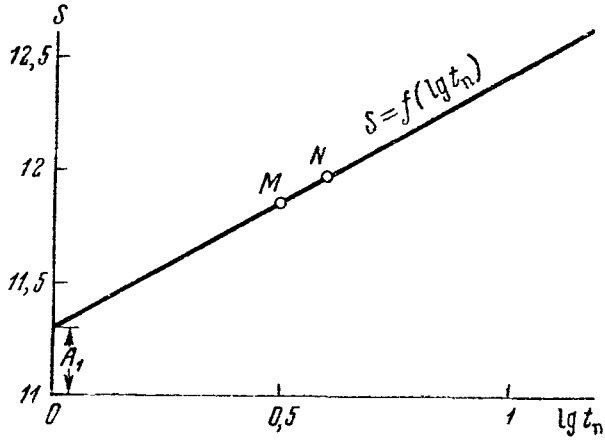


Рис. 46.

При работе большего количества скважин формулы в общем случае будут иметь следующий вид:

$$\lg t_n = \lg t\,(t - t_1)^{\alpha_1} \ldots (t - t_n)^{\alpha_n}; \qquad \text{(VIII, 47)}$$

$$Km = \frac{0{,}183Q}{C_1}; \qquad \text{(VIII, 48)}$$

$$\lg a = \frac{2\lg r_0 + 2\alpha_1 \lg r_1 + \ldots 2\alpha_n \lg r_n - (1 + \alpha_1 + \ldots \alpha_n) \cdot 0{,}35 + \frac{A_1}{C_1}}{1 + \alpha_1 \ldots + \alpha_n}, \qquad \text{(VIII, 49)}$$

где A_1 и C_1 — параметры прямой $S = f(\lg t_n)$;

t — время от начала откачки до момента расчета;

$t_1, t_2, \ldots, t_n$ — время начала работы скважин с номером $1, 2, \ldots, n$;

r_0 — радиус опытной скважины;

$r_1, r_2, \ldots, r_n$ — расстояние от скважины с номерами $1, 2, \ldots n$ до опытной скважины;

$$\alpha_1 = \frac{Q_1}{Q}; \quad \alpha_2 = \frac{Q_2}{Q}; \quad \alpha_n = \frac{Q_n}{Q},$$

где Q — дебит опытной скважины;

$Q_1, Q_2, \ldots Q_n$ — дебит скважин с номерами 1, 2, ..., n.

Расчетные точки для определения $\lg t_n$ и построения графика зависимости $S = f(\lg t_n)$ следует брать для моментов времени, превышающих время от начала откачки до пуска или остановки последней скважины.

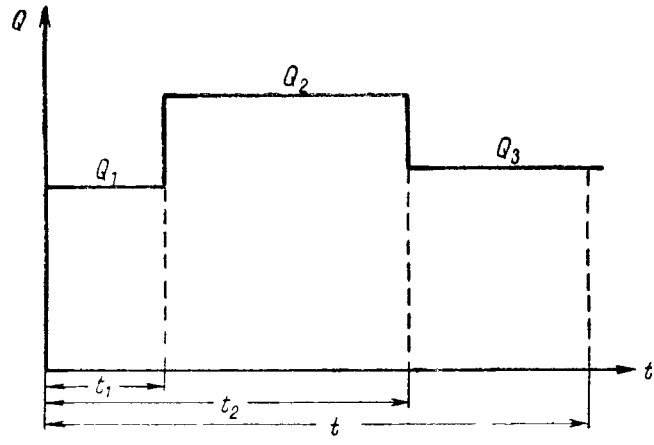


Рис. 47.

При изысканиях подземных вод в районах действующих водозаборов для определения параметров могут быть использованы данные эксплуатации. В связи с тем, что дебит водозабора во времени меняется, для расчета параметров изменения дебита схематично нужно представить в виде ступенчатого графика (рис. 47).

При изменениях дебита по ступенчатому графику для расчета параметров может быть использована методика, аналогичная методике, применяемой по групповой откачке. Для этого выбирают несколько расчетных периодов t_n и для каждого из них по формуле (VIII, 47) находят $\lg t_n$, коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n$, входящие в формулу (VIII, 47), определяются по следующим зависимостям:

$$\alpha_1 = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1};$$

$$\alpha_2 = \frac{Q_3 - Q_2}{Q_1}; \qquad \text{(VIII, 50)}$$

$$\alpha_{n-1} = \frac{Q_n - Q_{n-1}}{Q_1},$$

где Q_1 — первоначальный дебит скважины,

$Q_2, Q_3, \ldots Q_n$ — дебиты скважин соответственно в моменты времени t_1, t_2, t_{n-1} изменения дебита (см. рис. 47).

После этого строится график зависимости $S=f(\lg t_n)$ и определяются параметры графика A и B.

Коэффициент водопроводимости рассчитывается по формуле (VIII, 48), а коэффициент пьезопроводности — по формуле:

$$\lg a=\frac{2(1+\alpha_1+\ldots\alpha_{n-1})\lg r-(1+\alpha_1+\ldots+\alpha_{n-1})\cdot 0{,}35+\frac{A}{B}}{1+\alpha_1\ldots+\alpha_{n-1}}, \quad \text{(VIII, 51)}$$

где r — радиус водозабора, определяемый по формулам, приведенным в главе XVII.

Расчетные периоды при определении параметров при откачке с изменяющимся дебитом должны быть больше времени последнего изменения дебита, т. е. $t>t_{n-1}$.

Эта же методика может быть применена и для определения параметров из одиночной скважины, если дебит при откачке в связи с техническими условиями не остается постоянным.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОГО РАДИУСА ВЛИЯНИЯ

Величина приведенного радиуса влияния ($R_п$) определяется различными способами в зависимости от режима движения подземных вод.

Если режим движения неустановившийся, то приведенный радиус влияния определяется по формуле (IV, 7):

$$R_п=1{,}5\sqrt{at}.$$

Если же при проведении опытных откачек произошла стабилизация уровня, то приведенный радиус влияния можно определить по данным откачки по формуле Дюпюи

$$\lg R_п=\frac{S_1\lg r_2-S_2\lg r_1}{S_1-S_2}, \quad \text{(VIII, 52)}$$

где S_1 и S_2 — понижение в первой и второй наблюдательных скважинах;

r_1 и r_2 — расстояние этих скважин до центральной.

Однако следует учитывать, что в некоторых случаях представление о стабилизации является кажущимся и связанным с несовершенством наших измерительных приборов, так как скорости понижения уровней в скважинах со временем резко уменьшаются. В табл. 19 показано, как должно было бы изменяться понижение уровня воды в скважине, из которой ведется откачка, и на расстояниях 100 и 300 *м* от нее (при коэффициенте пьезопроводности $a=10^6$ *м²/сутки*).

Из табл. 19 видно, что в первые 12 часов после начала откачки понижение в опытной скважине достигает 86% от понижения в конце откачки, в то время как в следующие 12 часов оно увеличивается лишь на 3%, т. е. скорость изменения уровня умень-

Таблица 19

Время от начала откачки, *сутки*	Понижение уровня от понижения на конец десятых суток, %		
	в центральной скважине	в скважине на расстоянии 100 *м*	в скважине на расстоянии 300 *м*
0,5	86	61	46
1	89	70	58
2	93	79	71
5	97	91	87
10	100	100	100

шается более чем в 30 раз. Такая же закономерность характерна и для наблюдательных скважин. Так, на расстоянии 300 *м* понижение через 12 часов после начала откачки меняется на 46%, а в следующие 12 часов всего на 12%, т. е. и в этом случае скорость изменения уровня уменьшается в 4 раза. В дальнейшем изменение уровня становится еще меньшим.

При малых абсолютных значениях понижений (особенно в наблюдательных скважинах) через сравнительно небольшое время изменения понижений становятся такими малыми, что не могут быть замерены самыми чувствительными уровнемерами. Отсюда делается неправильный вывод о якобы установившемся движении и дальнейшие расчеты водозаборов проводятся по формулам установившегося движения, принимая наблюденный радиус депрессии за стабильный, что может существенно занизить величину срезок уровня и тем самым завысить эксплуатационные запасы.

Поэтому при проведении опытной откачки необходимо установить, является ли стабилизация действительной или кажущейся.

Для этого нужно провести контрольный расчет понижения уровня на момент предполагаемой стабилизации, определив предварительно коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности по первому периоду откачки, выражаемому на графике $S=f(\lg t)$ прямой линией, или по данным о восстановлении уровня. Затем по формуле Дюпюи (IV, 8), подставив в нее значение приведенного радиуса при неустановившемся движении, вычисленного по формуле (IV, 7), определяется понижение уровня, соответствующее времени проведения опыта. Если наблюденное понижение будет меньше рассчитанного, можно сделать вывод о наличии местного питания и истинной стабилизации и определить по данным откачки приведенный радиус влияния по формуле (VIII, 35).

В том случае, если наблюденное понижение уровня будет больше рассчитанного по формулам неустановившегося движения или примерно равно ему, стабилизация является кажущейся, связанной с несовершенством измерительной техники.

Пример расчета. Из напорного водоносного горизонта была проведена опытная откачка с постоянным дебитом 800 $м^3$/*сутки*

из скважины радиуса 0,1 *м*. Наблюдения за уровнем велись по центральной и двум наблюдательным скважинам, расположенным на расстоянии 50 и 100 *м* от центральной. Результаты откачки приведены в табл. 20.

Таблица 20

Время от начала откачки t, *ч*	Понижение уровня в центральной скважине S, *м*	Понижение уровня в наблюдательной скважине 1 S_1, *м*	Понижение уровня в наблюдательной скважине 2 S_2, *м*
2	5,17	1,46	1,05
4	5,33	1,62	1,21
6	5,42	1,71	1,30
8	5,46	1,75	1,34
10	5,49	1,78	1,37
12	5,51	1,80	1,39
16	5,54	1,83	1,42
20	5,56	1,85	1,44
24	5,56	1,85	1,44
28	5,57	1,86	1,45
32	5,57	1,86	1,45
36	5,58	1,87	1,46
40	5,58	1,87	1,46
44	5,58	1,87	1,46
48	5,58	1,87	1,46

Уровни в последние 14 часов не изменились, поэтому откачка была прекращена. Результаты наблюдений за восстановлением уровня показаны в табл. 21.

Таблица 21

Время t, *мин*	Повышение уровня S, *м*	Время t, *мин*	Повышение уровня S, *м*	Время t, *мин*	Повышение уровня S, *м*
1	3,79	9	4,45	25	4,76
2	4,00	10	4,48	30	4,81
3	4,12	11	4,51	35	4,86
4	4,21	12	4,54	40	4,90
5	4,27	13	4,56	45	4,93
6	4,33	14	4,58	50	4,96
7	4,38	15	4,60	55	4,99
8	4,41	20	4,69	60	5,02

С целью установления характера стабилизации (истинной или кажущейся) строим график зависимости $S=f(\lg t)$ для кривой восстановления (рис. 48) и определяем коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности. Из графика получаем $A=3{,}79$.

По формуле (VIII, 20) определяем C в точках M и N:

$$C = \frac{4{,}48 - 4{,}34}{1{,}0 - 0{,}8} = \frac{0{,}14}{0{,}2} = 0{,}70.$$

Определяем коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности по формулам (VIII, 21) и (VIII, 22):

$$Km = \frac{0{,}183 \cdot 800}{0{,}7} = 219 \ м^2 \ сутки;$$

$$\lg a = 2\lg 0{,}1 - 0{,}35 + \frac{3{,}79}{0{,}7} = 3{,}06;$$

$$a = 1150 \ м^2/мин = 1150 \cdot 1440 = 1{,}65 \cdot 10^6 \ м^2/сутки.$$

По найденному значению a и Km определяем понижение на конец опытной откачки $t = 48$ *час* (2 суток):

$$R_п = 1{,}5 \sqrt{at} = 1{,}5 \sqrt{1{,}65 \cdot 10^6 \cdot 2} = 2720 \ м;$$

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R_п}{r} = \frac{800}{6{,}28 \cdot 219} \ln \frac{2720}{0{,}1} = 0{,}61 \cdot 10{,}2 = 6{,}22 \ м.$$

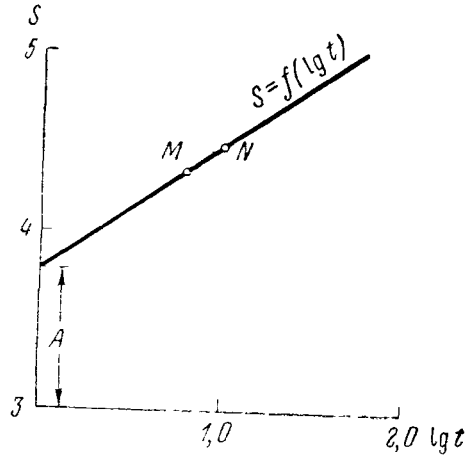


Рис. 48.

Замеренное понижение $S = 5{,}58$ *м*, т. е. на 64 *см* меньше, чем рассчитанное, исходя из предпосылки сохранения неустановившегося режима. Следовательно, стабилизация является истинной. Поэтому формулой (VIII, 52) можно пользоваться для определения приведенного радиуса:

$$\lg R_п = \frac{1{,}87\lg 100 - 1{,}46\lg 50}{1{,}87 - 1{,}46} = 3{,}07$$

$$R_п = 1170 \ м.$$

Изложенный выше прием определения характера стабилизации может дать более или менее точные результаты лишь при больших абсолютных значениях понижения и малых колебаниях дебита при откачках. Во всех случаях при определении характера стабилизации в основном нужно исходить из оценки природных условий, устанавливая существование источников дополнительного питания, приводящих к стабилизации (влияние реки, перетекания и т. д.).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Как отмечалось, величина фильтрационного сопротивления центральной скважины (ξ_0) складывается из двух составляющих, определяющих несовершенство по степени вскрытия водоносного пласта и влияние конструкции фильтровой части скважины. Величина ξ_0', характеризующая несовершенство по степени вскрытия, определяется по таблице 12. Величину ξ_0'', определяющую влияние конструкции, Ф. М. Бочевер и В. С. Алексеев (1965) предложили определять как разность между величинами ξ_0 и ξ_0'. Величина ξ_0 может быть определена по данным кустовой откачки с двумя наблюдательными скважинами. После преобразования выражения, приведенного в работе (1965), можно для расчета получить простые формулы:

$$\xi_0 = 4{,}6\left(\frac{S_0 - S_1}{S_1 - S_2}\lg\frac{r_2}{r_1} - \lg\frac{r_1}{r_0}\right). \qquad \text{(VIII, 53)}$$

При большом количестве наблюдательных скважин Ф. М. Бочевер и В. С. Алексеев рекомендуют использовать графоаналитический метод, заключающийся в построении и обработке графика

$$\Delta S = S_{i+1} - S_i = f\left(\lg\frac{r_{i+1}}{r_i}\right).$$

Для построения графика берутся разности понижений по всем парам скважин, включая центральную. Графики, построенные в координатах ΔS—$\lg\frac{r_{i+1}}{r_i}$, представляют прямые линии. При этом прямые, построенные по дальним наблюдательным скважинам, проходят через начало координат. Прямые, построенные по центральной и наблюдательной скважине, отсекают на оси ординат отрезок.

Если определить для полученных прямых угловой коэффициент B_1 и начальную ординату A_1, можно рассчитать величины Km и ξ_0 по формулам

$$Km = \frac{0{,}366Q}{B_1}; \qquad \text{(VIII, 54)}$$

$$\xi_0 = \frac{4{,}6A_1}{B_1} \qquad \text{(VIII, 55)}$$

Угловой коэффициент B_1 определяется по координатам двух любых точек графика по формуле

$$B = \frac{(S_{i+1} - S_i) - (S_i - S_{i-1})}{\lg\frac{r_{i+1}}{r_i} - \lg\frac{r_i}{r_{i-1}}} \qquad \text{(VIII, 56)}$$

Следует иметь в виду, что изложенная выше методика определения показателя несовершенства ξ_0 может применяться только в относительно однородных пластах.

Глава IX

СТАДИИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И КАТЕГОРИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Гидрогеологические исследования, производящиеся для выявления и оценки эксплуатационных запасов подземных вод, разделяются на следующие стадии: поисковые работы, предварительная разведка и детальная разведка.

ПОИСКОВЫЕ РАБОТЫ

Поисковые работы служат для выявления участков с водоносными горизонтами, перспективными для получения требуемого количества воды соответствующего качества и по возможности вблизи от водопотребителя. В хорошо изученных районах, где перспективные участки можно выделить по имеющимся гидрогеологическим материалам эти работы не проводятся.

Поисковые работы включают в себя гидрогеологические съемки масштаба 1 : 50 000—1 : 200 000, геофизические работы, буровые и горные работы, опытные и лабораторные работы, наблюдения за режимом подземных вод и др. Эти работы проводятся на перспективных участках, намечаемых по общим гидрогеологическим соображениям (мелкомасштабным гидрогеологическим картам, геологическим картам, различным описаниям, одиночным буровым скважинам и пр.).

Гидрогеологическая съемка проводится только при отсутствии по району работ полноценных гидрогеологических карт соответствующего масштаба.

В крупных артезианских бассейнах и районах глубокого погружения подземных вод конусов выноса гидрогеологическая съемка при поисках не производится. Методика выполнения гидрогеологических съемок изложена в соответствующих методических руководствах (Маккавеев, Рябченков; 1961).

Геофизические работы должны предшествовать бурению поисковых скважин. На стадии поисков геофизические работы производятся для выявления древних погребенных долин, тектонических зон, зон интенсивной трещиноватости, карста, определения глубины залегания подземных вод и степени их минерализации, определения рельефа водоупорных пород, подстилающих водоносные горизонты и др.

В степных, полупустынных и пустынных районах для поисков неглубоких пресных вод применяются геоботанические исследования. Бурение поисковых скважин проводится с целью вскрытия и опробования в отдельных точках подземных вод, для выяснения в общих чертах условий залегания, распространения и строения водоносных горизонтов, а также для предварительного суждения о возможности использования подземных вод.

Опытные работы на стадии поисков заключаются в основном в проведении пробных откачек из одиночных скважин для сравнительной оценки водопроводимости пластов или массивов горных пород на различных участках изучаемой территории. Из водоносных горизонтов, имеющих практическое значение, проводятся опытные откачки.

По данным поисковых работ даются характеристики перспективных участков для постановки на них предварительной разведки и общие соображения об условиях эксплуатации подземных вод.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Предварительная разведка подземных вод производится с целью выбора участков (или участка) расположения водозаборов для постановки на них в дальнейшем детальной разведки. Эти участки выбираются с учетом требований к количеству и качеству подземных вод в зависимости от назначения и согласовываются с водопотребителем или проектной организацией, а в случае разведки подземных вод для хозяйственно-питьевых или лечебных целей и с органами санитарного надзора.

В хорошо изученных районах, ресурсы подземных вод которых заведомо превышают потребность, предварительная разведка не производится, а участок водозаборов для детальной разведки выделяется по имеющимся гидрогеологическим материалам.

На основании данных предварительной разведки должен быть произведен предварительный подсчет эксплуатационных запасов подземных вод по всем разведанным участкам.

Предварительная разведка грунтовых и неглубоких напорных вод заключается в бурении разведочных скважин для уточнения геологического разреза участка, условий залегания, мощности и состава водоносных пород и разделяющих их толщ, уровней и распределения напоров, химического состава подземных вод. В дополнение к буровой разведке, так же как на стадии поисков, в некоторых случаях целесообразно производить геофизическую разведку.

Для изучения химического состава подземных вод производятся сокращенные и полные химические анализы, а также определения содержания вредных компонентов (медь, цинк, свинец, мышьяк, радиоактивные элементы, фтор, фенол и др.). Должна быть также дана характеристика бактериологического состава воды.

Для выяснения условий питания подземных вод производится изучение их режима по характерным поперечникам.

Гидрометрические работы проводятся во всех случаях, когда поверхностные воды будут участвовать в восполнении эксплуатационных запасов подземных вод. В результате их проведения должна быть получена характеристика питания водоносного горизонта в различные периоды года.

ДЕТАЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

Детальная разведка производится с целью изучения участков (или участка) расположения водозаборов, обеспечивающего окончательную оценку эксплуатационных запасов подземных вод, получение материалов для проектирования водозаборных сооружений и расширение действующих водозаборов.

Если по данным поисковых работ или имеющихся материалов можно выделить участок с благоприятными технико-экономическими и гидрогеологическими условиями, позволяющими получить подземные воды соответствующего качества в количестве, заведомо превышающем потребность, детальная разведка может производиться без предварительной разведки.

На стадии детальной разведки проводятся те же виды работы, что и при предварительной разведке. Буровые скважины закладываются в основном применительно к намеченной схеме водозабора. Большинство скважин должно иметь диаметры, позволяющие использовать их для эксплуатации.

Опытные откачки при детальной разведке являются главным видом работ. Откачками должны быть уточнены значения гидрогеологических параметров водоносных пластов, характер зависимости между дебитом и понижением уровня воды, а также величин срезок для расчетов взаимодействия скважин.

На участках эксплуатируемых водозаборов должны быть организованы наблюдения за режимом их работы, а также заложены соответствующие наблюдательные скважины для установления глубины и границ в плане депрессионной воронки, вызванной эксплуатацией.

КАТЕГОРИИ ЗАПАСОВ

Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) разработана классификация эксплуатационных запасов подземных вод (1962). По этой классификации эксплуатационные запасы подземных вод подразделяются на четыре категории А, В, C_1 и C_2. Отнесение запасов к той или иной категории производится в зависимости от степени разведанности подземных вод, изученности их качества и условий эксплуатации.

Категория А — запасы, разведанные и изученные с детальностью, обеспечивающей полное выяснение условий залегания, строения и величин напора водоносных горизонтов, а также фильтрационных свойств водовмещающих пород; выяснение условий питания водоносных горизонтов и возможности восполнения эксплуатационных запасов; установление связи оцениваемых подземных вод с водами других водоносных горизонтов и поверхностными водами.

Качество подземных вод изучено с достоверностью, обеспечивающей возможность использования их по заданному назначению на расчетный срок водопотребления.

Эксплуатационные запасы подземных вод на участке проектируемого водозабора определены по данным эксплуатации, опытно-эксплуатационных или опытных откачек.

Категория В — запасы, разведанные и изученные с детальностью, обеспечивающей выяснение основных особенностей условий залегания, строения и питания водоносных горизонтов, а также установление связи подземных вод, запасы которых определяются, с водами других водоносных горизонтов и поверхностными водами; определение приближенного количества естественных водных ресурсов как источников восполнения эксплуатационных запасов подземных вод.

Качество подземных вод изучено в такой мере, которая позволяет установить возможность использования их для заданного назначения.

Эксплуатационные запасы подземных вод на участке проектируемого водозабора определены по данным опытных откачек или по расчетной экстраполяции.

Категория C_1 — запасы, разведанные и изученные с детальностью, обеспечивающей выяснение в общих чертах строения, условий залегания и распространения водоносных горизонтов.

Качество подземных вод изучено в такой мере, которая обеспечивает предварительное решение вопроса о возможности их использования по заданному назначению.

Эксплуатационные запасы подземных вод определены по данным пробных откачек из единичных разведочных выработок, а также по аналогии с существующими водозаборами или примыкающими участками, по которым запасы подземных вод того же водоносного горизонта определены по категориям А и В.

Категория C_2 — запасы, установленные на основании общих геолого-гидрогеологических данных, подтвержденных опробованием водоносного горизонта в отдельных точках, либо по аналогии с разведанными участками.

Качество подземных вод определено по пробам, взятым в отдельных точках водоносного горизонта, либо по аналогии с изученными участками того же горизонта.

Эксплуатационные запасы подземных вод определены в пре-

делах выявленных благоприятных структур и комплексов водовмещающих пород.

Утверждение запасов по категории А и В дает право на составление проектов водоснабжения и выделение капитальных вложений на строительство новых и реконструкцию действующих водозаборов, причем запасы по категориям А должны составлять не менее 50%. В отдельных случаях с разрешения ГКЗ этот процент может быть снижен. На участках с особо сложными гидрогеологическими условиями, где выявление запасов подземных вод по категории А в процессе разведки нецелесообразно, так как потребовало бы проведения весьма значительного объема разведочных и опытных работ, допускается проектирование и выделение капитальных вложений на базе категории В.

В классификации эксплуатационных запасов указывается, что при определении перспектив увеличения отбора воды путем расширения водозаборов должны также учитываться запасы по категории C_1. Оценка эксплуатационных запасов по этой категории в основном преследует цель выявления площадей для проведения в дальнейшем, когда в этом возникает необходимость, соответствующих разведочных работ для выявления запасов по более высоким категориям.

Запасы по категориям А и В требуют проведения детальной разведки, запасы по категории C_1 обосновываются данными предварительной разведки и поисковых работ. При подсчете эксплуатационных запасов по категории C_2 можно использовать обзорные (мелкомасштабные) карты, руководствуясь общими соображениями о балансе подземных вод в том или ином районе, и учитывать в качестве аналогов данные по более разведанным площадям.

Глава X

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНАХ ПЛАТФОРМЕННОГО ТИПА

Крупные артезианские бассейны платформенного типа играют значительную роль в водоснабжении многих городов и промышленных предприятий. В Советском Союзе на использовании подземных вод артезианских бассейнов основано водоснабжение таких крупных городов, как Киев, Харьков, Курск и др. Почти все города Московской области снабжаются водой каменноугольных отложений Подмосковного артезианского бассейна, причем дебиты отдельных водозаборов достигают десятков и даже сотен тысяч кубометров в сутки.

В СССР наиболее крупными артезианскими бассейнами являются Подмосковный, Днепровско-Донецкий и Западно-Сибирский. Отличительными чертами этих бассейнов, которые следует учитывать при производстве гидрогеологических исследований и оценке эксплуатационных запасов подземных вод, являются:

1) значительная площадь распространения водоносных пластов, измеряемая десятками и сотнями тысяч квадратных километров (например, площадь распространения юрского водоносного горизонта в Днепровско-Донецкой впадине составляет 30 000 $км^2$);

2) развитие в бассейнах комплекса «этажных» водоносных горизонтов, как правило, разделенных выдержанными слабопроницаемыми породами;

3) мощность водоносных горизонтов, особенно в центральных частях бассейнов, достигает большой величины, измеряемой нередко сотнями метров (например, общая мощность водоносных горизонтов в каменноугольных отложениях на территории Подмосковного бассейна составляет 250—300 *м*);

4) значительная глубина залегания водоносных горизонтов, закономерно увеличивающаяся при движении от областей питания к центральным частям бассейна;

5) большие величины напоров над кровлей водоносных пород (десятки и сотни метров), увеличивающиеся над кровлей от краевых к центральным частям бассейна; в областях питания и дренирования подземные воды обычно имеют свободную поверхность;

6) большие расстояния от центральных частей бассейна до внешних областей питания — выходов водоносных пластов на по-

верхность (например, выходы каменноугольных пород на северо-западной, западной и южной границах Подмосковного бассейна находятся на расстоянии 300—350 *км* от Москвы);

7) как правило, наличие гидрохимической зональности подземных вод, характеризующейся увеличением минерализации подземных вод с глубиной;

8) огромные естественные запасы подземных вод.

Перечисленные особенности — развитие комплекса водоносных горизонтов, перекрытых слабопроницаемыми породами, большие расстояния до внешних областей питания, большие глубины залегания — являются основными факторами, обусловливающими динамику подземных вод артезианских бассейнов и определяющими упругий водонапорный режим фильтрации.

Однако представления о том, что артезианские горизонты имеют области питания и разгрузки только в местах выхода водоносных пород на поверхность опровергнуты имеющимся фактическим материалом. На динамику подземных вод артезианских бассейнов большое влияние может оказывать наличие местных областей питания и разгрузки, образованию которых способствуют следующие факторы:

1) крупные, глубоковрезанные, часто переуглубленные речные долины, оказывающие дренирующее влияние на пьезометрическую поверхность;

2) «окна» в кровле пласта, через которые может быть привлечен дополнительный приток из вышележащих грунтовых горизонтов и даже поверхностных водотоков, могущие иметь, с одной стороны, положительное значение (создание областей местного питания), с другой стороны, вредные последствия (загрязнение или засолонение эксплуатируемых артезианских вод);

3) процессы перетекания через слабопроницаемые ложе и кровлю пластов (песчаные глины, мергели, трещиноватые породы) из выше- и нижележащих водоносных горизонтов.

Как показывает фактический материал, в большинстве случаев для верхних горизонтов артезианских бассейнов градиенты вертикальной фильтрации очень незначительны (как правило, меньше единицы), но в отдельных случаях, особенно при эксплуатации, могут достигать значительных величин.

При всем многообразии природных факторов, определяющих динамику подземных вод в артезианских бассейнах, можно выделить определенные расчетные схемы по типам граничных условий.

Граничные условия в разрезе: 1) водоносный пласт изолирован от выше- и нижележащих водоносных горизонтов мощными слоями водоупорных глинистых отложений (напорные градиенты вертикальной фильтрации очень малы, перетекание через слабопроницаемые перекрытия практического значения не имеет);

2) водоносный пласт связан с ниже- и вышележащими водоносными горизонтами, из которых на всей площади распростра-

нения пласта происходит фильтрация через слабопроницаемые слои (напорные градиенты вертикальной фильтрации значительны);

3) водоносный пласт связан с вышележащими только через «окна», в частности, через древние долины размыва.

Граничные условия в плане: 1) водозаборные сооружения расположены в центральных частях бассейна, где в зоне влияния водозабора отсутствуют водотоки, гидравлически связанные с подземными водами, и поэтому пласт может рассматриваться как неограниченный; 2) водозаборные сооружения расположены вблизи крупных водотоков, гидравлически связанных с подземными водами.

В практике использования подземных вод артезианских бассейнов наиболее часто встречаются природные условия, в которых пласт можно рассматривать как неограниченный или полуограниченный (при наличии связи с поверхностными водотоками).

В первом случае (неограниченный пласт) при постоянном дебите водозаборных скважин происходит непрерывное снижение пьезометрического уровня и развитие воронки депрессии, во втором — через некоторое время, когда возмущение достигает реки, происходит стабилизация движения.

Схемы, связанные с наличием перетекания через слабопроницаемый слой, имеют более ограниченное значение. Как было показано, процессы перетекания через слабопроницаемые кровлю и подошву пласта изучены недостаточно. До настоящего времени не установлено, при каких градиентах начинается вертикальная фильтрация через слабопроницаемые слои. Поэтому расчеты эксплуатационных запасов с учетом перетекания следует, как отмечалось, проводить только тогда, когда оценка запасов по теории упругого режима показывает необеспеченность запасов, а по гидрогеологическим условиям перетекание возможно.

Кроме того, следует помнить, что влияние процессов перетекания частично учтено в полученных опытным путем расчетных параметрах.

Для схем, связанных с фильтрацией через «окна», в настоящее время трудно предложить какое-нибудь универсальное решение, так как и положение этих «окон» в плане, и расположение относительно водозаборных сооружений может быть самым разнообразным. Следует только учитывать, что «окна» способствуют получению дополнительного количества воды, так как вышележащие горизонты в данном случае играют роль регулирующей емкости. Поэтому расчет по упругому режиму, без учета «окон», всегда дает некоторый запас в вычисленных понижениях.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод артезианских бассейнов должна производиться, как отмечалось, путем совместного применения гидравлического и гидродинамического методов.

В слабоизученных районах для предварительных расчетов

а также в условиях фильтрационной однородности (при сравнительно близких значениях удельных дебитов) и прямолинейной зависимости между дебитом и понижением возможно применение гидродинамического метода.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод при наличии взаимосвязи с поверхностными водотоками (полуограниченный пласт) рассмотрена в гл. XV.

Для наглядности приведем пример оценки эксплуатационных запасов подземных вод этим методом.

Для обеспечения предприятия питьевой водой выбран напорный водоносный горизонт в среднезернистых песках мощностью 30 *м* и высотой напора над кровлей водоносного пласта 50—60 *м*. Глубина статического уровня подземных вод 20 *м*. Водоносный горизонт отделен от ниже- и вышележащих горизонтов толщами плотных глин мощностью 20—25 *м* каждая. Глинистые пласты выдержаны на площади сотен квадратных километров и не содержат «окон». С поверхностными водотоками напорный горизонт не связан. Потребность предприятия в питьевой воде 60 *л/сек*. По данным других скважин, использующих этот водоносный горизонт, средний дебит эксплуатационных скважин 20 *л/сек*. Таким образом, для получения требуемого дебита надо заложить три скважины.

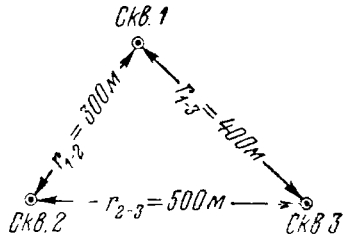


Рис. 49.

В описываемых условиях водоносный пласт может рассматриваться как неограниченный, а расчет эксплуатационных запасов производиться по формулам упругого режима.

Места заложения скважин были выбраны по топографическим условиям. Расположение скважин и расстояния между ними показаны на рис. 49.

Из каждой скважины произведены четырехдневные откачки, при которых велись наблюдения за уровнем во всех трех скважинах. Откачки проводились при постоянном дебите скважины ($Q=15$ *л/сек*). Радиус фильтров скважин $r_0=0{,}2$ *м*. Кроме четырехдневных откачек, были проведены откачки при дебите 8 *л/сек* в течение 36 *час* для определения зависимости дебита от понижения. Полученная зависимость оказалась очень близкой к прямолинейной.

По данным откачек определены коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности. Все определения дали довольно близкие результаты при средних значениях коэффициента пьезопроводности $a=2{,}25\cdot10^6$ *м²/сутки* и коэффициента водопроводности $Km=220$ *м²/сутки*.

В связи с тем, что пласт однороден, расчет эксплуатационных запасов производим гидродинамическим методом. Расчетный период эксплуатации примем $t=10\,000$ *суток*.

Определяем понижение в скважине 1, находящейся в наихудших условиях (она расположена на более близких расстояниях от остальных скважин). Дебит каждой скважины примем равным 20 *л/сек*.

Расчеты ведем по формуле для неограниченного пласта (IV, 19)

$$S=\frac{1}{2\pi Km}[Q_{\text{сум}}\ln R_{\text{п}}-(Q_1\ln r_0+Q_2\ln r_{1-2}+Q_3\ln r_{1-3})],$$

где r_{1-2} — расстояние между скважинами 1 и 2;
r_{1-3} — то же между скважинами 1 и 3.

Так как

$$Q_1=Q_2=Q_3=\frac{Q_{\text{сум}}}{3},$$

то

$$S=\frac{Q_1}{2\pi Km}[3\ln R_{\text{п}}-(\ln r_0+\ln r_{1-2}+\ln r_{1-3})].$$

Приведенный радиус влияния определим по формуле (IV, 7):

$$R_{\text{п}}=1{,}5\sqrt{at}=1{,}5\sqrt{2{,}25\cdot 10^6\cdot 10^4}=2{,}25\cdot 10^5\ м.$$

Таким образом, понижение в скважине 1 при взаимодействии со скважинами 2 и 3 составит:

$$S=\frac{20\cdot 86{,}4}{6{,}28\cdot 220}[3\ln 2{,}25\cdot 10^5-(\ln 0{,}2+\ln 300+\ln 400)]=33{,}6\ м.$$

Так как это понижение не превосходит допустимого (меньше величины напора над кровлей, составляющего 50 *м*) при глубине динамического уровня от поверхности земли 53,6 *м*, запасы можно считать обеспеченными.

При проведении гидрогеологических исследований для оценки эксплуатационных запасов подземных вод на отдельных участках артезианских бассейнов платформенного типа необходимо:

а) выяснить геологическое строение, определяющее граничные условия: количество водоносных горизонтов, их мощности и глубины залегания, мощности разделяющих пород, наличие дренирующих водотоков, «окон», величины напоров над кровлей водоносных пластов;

б) исследовать химический состав подземных вод;

в) определить расчетные параметры — коэффициенты водопроводимости (Km) и пьезопроводности (a), а также, что очень важно, зависимость между дебитом и понижением;

г) при взаимодействии скважин определить величину срезок уровня.

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод следует различать исследования в хорошо изученных и слабо изученных бассейнах. В хорошо изученных крупных артезианских бассейнах, например в Подмосковном и Днепровско-Донецком, где действует

большое количество крупных водозаборов, основой для выяснения поставленных вопросов должны являться все имеющиеся материалы по бассейну, в том числе обязательно опыт существующей эксплуатации. На основании проработки фондового материала выбирается участок заложения водозаборных скважин и проводится рекогносцировочное обследование выбранного участка для уточнения места заложения водозаборных скважин.

Учитывая выдержанность геологического строения артезианских бассейнов, в хорошо изученных районах рекомендуется проводить бурение разведочно-эксплуатационных скважин. При выборе мест заложения скважин во всех случаях следует ориентироваться на пониженные участки, где глубина до статического уровня подземных вод будет наименьшей. Расстояния между скважинами должны выбираться с учетом экономических показателей. С гидродинамической точки зрения наиболее целесообразными являются расстояния в 300—500 *м*, потому что дальнейшее увеличение расстояний дает обычно небольшое уменьшение срезок при взаимодействии.

Количество разведочно-эксплуатационных скважин определяется общей потребностью в воде и возможным дебитом одной скважины (последний устанавливается по фондовым данным).

Из каждой скважины проводятся опытные откачки и отбираются пробы на химический и бактериологический анализы. По результатам опытных откачек определяются коэффициенты водопроводимости, пьезопроводности и устанавливается зависимость между дебитом и понижениями.

В особо сложных гидрохимических условиях, когда существует опасность подсоса минерализованных вод, кроме опытных откачек для определения параметров и срезок уровня, следует провести опытно-эксплуатационную откачку в течение 1—1,5 месяца для определения возможных изменений качества воды.

При оценке эксплуатационных запасов следует также учесть влияние проектируемого или расширяющегося водозабора на существующие в радиусе 10—20 *км* водозаборы, эксплуатирующие данный водоносный горизонт.

В слабо изученных артезианских бассейнах первым этапом является гидрогеологическая съемка масштаба 1 : 200 000—1 : 500 000, сопровождающаяся бурением поисковых скважин. После этого проводится предварительная разведка, заключающаяся в бурении одиночных разведочных скважин, и производство пинтервальных пробных (в отдельных случаях опытных) откачек с отбором проб воды на анализ.

После проведения предварительной разведки выбирается участок для детальной разведки, на котором производится бурение разведочно-эксплуатационных скважин, опробуемых так же, как и в хорошо изученных районах.

Глава XI

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНАХ ГОРНОСКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЕЙ

К синклинальным структурам горноскладчатых областей нередко приурочены артезианские бассейны, отличающиеся от артезианских бассейнов платформенного типа относительно небольшими размерами и в связи с этим меньшими естественными запасами подземных вод.

Артезианские бассейны горноскладчатых областей могут быть подразделены на два типа: 1) межгорные долины высокогорных районов; 2) синклинальные структуры (мульды) в складчатых районах, подвергшихся впоследствии пенепленизации. Примерами первых могут служить Алазанская и Ферганская долины, примером вторых — Карагандинская мульда.

Подземные воды межгорных долин, обрамленных высокими хребтами, получают обильное питание. Водоносные горизонты приурочены к толщам коренных горных пород, образующим синклинальную структуру, и покрывающим их пролювиальным образованиям (чередующиеся слои галечников и суглинков). Общая мощность водоносных горизонтов нередко составляет сотни метров.

Значительное превышение области питания водоносного горизонта над межгорной равниной обусловливает большие напоры подземных вод над поверхностью земли (выражающиеся десятками, а иногда более 100 *м*). Напоры подземных вод возрастают по мере углубления в водоносную толщу, состоящую обычно из нескольких этажнорасположенных водоносных горизонтов, разделенных относительно слабопроницаемыми слоями.

Движение подземных вод происходит в направлении от гор к межгорной равнине, причем различие напоров по вертикали одновременно обусловливает восходящее движение воды к поверхности земли. В районах с жарким сухим климатом разгрузка подземных вод, поднимающихся с глубин, происходит в основном путем испарения с капиллярной каймы грунтовых вод, а в районах с влажным климатом это движение может приводить к заболачиванию поверхности земли. Подобные условия циркуляции подземных вод обусловливают определенную закономерность их минерализации: она возрастает по мере движения от гор к зоне

разгрузки, а в пределах этой зоны — снизу вверх (обращенная гидрохимическая зональность).

Гидрогеологические условия отдельных синклинальных структур (мульд) древних равнин и мелкосопочника существенно отличаются от гидрогеологических условий межгорных долин. Отсутствие горного обрамления мульд обусловливает относительно небольшие напоры артезианских вод над поверхностью земли, напорные градиенты (уклоны) потока от области питания к области разгрузки меньше, поэтому условия для циркуляции подземных вод менее благоприятны. Минерализация подземных вод в мульдах, как правило, значительно выше, чем в межгорных долинах, особенно в областях аридного климата, где питание подземных вод затруднено и эксплуатация водозаборов обеспечивается в основном сработкой естественных запасов. Наконец, в мульдах, расположенных вне горных областей, отсутствуют пролювиальные отложения, обладающие значительной водопроницаемостью.

Несмотря на эти различия, методика разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод в межгорных долинах и мульдах имеет много общего, так как и те и другие характеризуются небольшими артезианскими бассейнами при относительно близко расположенных областях питания.

Разведка и оценка запасов подземных вод, приуроченных к пролювиальным отложениям межгорных долин, производятся по той же методике, что и для пролювиальных шлейфов, поскольку геологическое строение и гидрогеологические условия однотипны.

При больших размерах артезианской структуры (площадь бассейна несколько тысяч квадратных километров и более) оценка эксплуатационных запасов должна производиться теми же методами, что и для артезианских бассейнов платформенного типа. Для относительно малых бассейнов, когда при эксплуатации водозабора депрессионная воронка может распространиться до границ водоносного пласта, оценка запасов имеет свои особенности.

Поисковые работы, при которых должны быть выяснены основные черты гидрогеологических условий межгорной долины или мульды, заключаются в проведении гидрогеологической съемки масштаба 1 : 50 000—1 : 200 000. Для небольших мульд (при их длине и ширине не более 10—15 *км*) съемкой следует охватить всю мульду. Если мульда имеет значительные размеры, то площадь съемки можно ограничить районом возможного влияния намечаемого водозабора.

При съемке особое внимание следует обращать на выяснение условий питания подземных вод, в частности, на возможность усиления этого питания в случае снижения напоров при эксплуатации. Нередко в естественных условиях питание незначительно вследствие близкого залегания грунтовых вод от поверхности и большого испарения через капиллярную кайму. При образовании депрессии может произойти усиление питания водоносного гори-

зонта, так как уровни грунтовых вод в области питания снизятся и испарение уменьшится.

Предварительную разведку при съемке следует производить по линии, примерно совпадающей с направлением падения пластов горных пород. По этому направлению изменения состава и мощности водоносных пластов, напоров, минерализации подземных вод наибольшие, что позволяет при минимуме разведочных работ установить основные, наиболее характерные особенности гидрогеологических условий района. Из всех разведочных скважин производятся пробные откачки, а из скважин, которые приходятся на участки возможного расположения водозаборов, — опытные откачки.

После проведения гидрогеологической съемки и предварительной разведки выбирается участок водозабора, на котором производятся детальные разведочные работы. На выбранном участке скважины целесообразно бурить такого диаметра, чтобы в последующем их можно было использовать для эксплуатации. Скважины опробуются с помощью опытных откачек для построения кривых дебита, определения срезок и расчетов гидрогеологических параметров (коэффициентов фильтрации и пьезопроводности) по обычной методике. Если скважины фонтанируют, то на них должны быть установлены регуляторы (краны, задвижки), обеспечивающие работу скважин с постоянным расходом.

В относительно небольших артезианских бассейнах через некоторое время после начала эксплуатации депрессия может распространяться до границ водоносного пласта (до этого понижение происходит так же, как в пласте неограниченных размеров). С течением времени влияние контуров все более усиливается. Если в области питания подземных вод протекают реки, имеющие прямую гидравлическую связь с подземными водами, то это приводит к стабилизации понижений в эксплуатационных скважинах. В других, более часто встречающихся, случаях контуром водоносного пласта служат водоупорные породы, тогда снижение уровней в скважинах происходит с постоянной скоростью.

Границы водоносного пласта в плане могут быть весьма сложными. При схематизации их для проведения задачи к расчетному виду предельными случаями можно считать круговое очертание границы (пласт-круг) и наличие двух параллельных прямолинейных границ (пласт-полоса). Первая схема (пласт-круг) соответствует условию, когда длина мульды незначительно (не более чем в три-пять раз) превосходит ширину. В таких случаях следует найти приведенный радиус круга, имеющего ту же площадь, что и площадь распространения водоносного горизонта. Вторая схема (пласт-полоса) может быть принята в тех случаях, когда длина артезианского бассейна значительно больше его ширины, что свойственно, например, межгорным долинам.

Оценка эксплуатационных ресурсов производится с учетом осушения пласта при длительной эксплуатации. При круговом

контуре питания и расположения водозабора в центральной части бассейна понижение уровня воды в скважине при ее работе без взаимодействия можно определить по формуле (IV, 56).

Разделим числитель и знаменатель второго слагаемого в этой формуле на коэффициент пьезопроводности (a) и представим $\pi R^2_к = F$, где F — площадь распространения водоносного горизонта. Тогда формула (IV, 56) получит следующее выражение:

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi Km} \ln \frac{0{,}47R_к}{r_0} + \frac{Qt}{\frac{Km}{a} \cdot F}. \qquad \text{(XI, 1)}$$

Величина $\frac{Km}{a} = \mu^*$ характеризует, по Ф. М. Бочеверу, содержание воды в единице объема, извлекаемой при упругом режиме фильтрации. Действительно, она является аналогом водоотдачи пород в условиях безнапорных вод, где по формуле (IV, 2):

$$\frac{Kh_{ср}}{\mu} = a_y; \quad \frac{Kh_{ср}}{a_y} = \mu.$$

Следовательно,

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi Km} \ln \frac{0{,}47R_к}{r_0} + \frac{Qt}{\mu^* F}. \qquad \text{(XI, 2)}$$

Формула (XI, 2) определяет понижение уровня воды в скважине в напорных водах. При эксплуатации водозабора в артезианском бассейне небольшого размера его дебит обеспечивается не только извлечением воды под действием упругого режима (в области, где воды напорные), но и вследствие осушения пласта в зоне питания, где воды безнапорные. В связи с этим в формулу (XI, 1) вместо величины $\frac{Km}{a} F$ надо подставить сумму $\mu F_1 + \frac{Km}{a} F_2$.

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi Km} \ln \frac{0{,}47R_к}{r_0} + \frac{Qt}{\mu F_1 + \frac{Km}{a} F_2}, \qquad \text{(XI, 3)}$$

где F_1 — площадь питания водоносного горизонта (безнапорные воды);

F_2 — площадь распространения водоносного горизонта (напорные воды);

μ — водоотдача пород в области питания.

Срезка уровня при работе взаимодействующих скважин, расположенных в центральной части артезианского бассейна, определяется по формуле:

$$\Delta S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{0{,}47R_к}{r} + \frac{Q}{\mu F_1 + \frac{km}{a} \cdot F_2}, \qquad \text{(XI, 4)}$$

где r — расстояние до скважины, откачка из которой вызывает срезку уровня в данной скважине.

Пример расчета. Требуется определить понижение уровня в скважинах водозабора, расположенного в центральной части малого артезианского бассейна — мульды.

Водоносный горизонт приурочен к трещиноватым породам и имеет общую площадь распространения 1200 $км^2$. Область питания прослеживается вдоль краевых частей бассейна в виде полосы и имеет площадь $F_1 = 670$ $км^2$. В центральной части бассейна, площадь которой $F_2 = 530$ $км^2$, воды напорные. Мощность водоносного горизонта 50 $м$, высота напора над кровлей пласта 60 $м$. Коэффициент фильтрации $k = 10$ $м/сутки$, водоотдача $\mu = 0{,}05$, коэффициент пьезопроводности $a = 10^5$ $м^2/сутки$.

Водозабор состоит из трех скважин, которые предполагается эксплуатировать соответственно с дебитами 4000, 6000 и 7000 $м^3/сутки$, радиус скважин $r_0 = 0{,}15$ $м$. Продолжительность эксплуатации $a = 10^4$ суток. Расстояния между скважинами показаны в табл. 22.

Таблица 22

Скважина	Дебит, $м^3/сутки$	Расстояние между скважинами, $м$			Понижение уровня в скважинах с учетом взаимодействия, $м$
		Скв. 1	Скв. 2	Скв. 3	
1	4000	—	300	400	32,2
2	6000	300	—	350	40,7
3	7000	400	350	—	46,8

Определяем по формуле (IV, 51) приведенный радиус круга:

$$R_к = \sqrt{\frac{1200}{3{,}14}} = 19{,}6 \text{ км}.$$

Определяем понижение в скв. 1, которое складывается из понижения S_1 при откачке из этой скважины как одиночной, и срезки уровней ΔS_2 и ΔS_3, вызываемых соответственно откачками из скважин 2 и 3.

По формуле (XI, 3):

$$S_0 = \frac{4000}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 10 \cdot 50} \ln \frac{0{,}47 \cdot 19\,600}{0{,}15} + \frac{4000 \cdot 10^4}{0{,}05 \cdot 670 \cdot 10^4 + \frac{10 \cdot 50 \cdot 530 \cdot 10^6}{10^5}} = 15{,}1 \text{ м}.$$

По формуле (XI, 4):

$$\Delta S_2 = \frac{6000}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 10 \cdot 50} \ln \frac{0{,}47 \cdot 19\,600}{300} + \frac{6000 \cdot 10^4}{0{,}05 \cdot 670 \cdot 10^4 + \frac{10 \cdot 50 \cdot 530 \cdot 10^6}{10^5}} = 8{,}2 \text{ м},$$

$$\Delta S_3 = \frac{7000}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 10 \cdot 50} \ln \frac{0{,}47 \cdot 19\,600}{400} +$$

$$+ \frac{7000 \cdot 10^4}{0{,}05 \cdot 670 \cdot 10^6 \cdot \frac{10 \cdot 50 \cdot 530 \cdot 10^5}{10^7}} = 8{,}9 \text{ м}.$$

Понижение в скважине 1 в условиях ее взаимодействия со скважинами 2 и 3, таким образом, составит:

$$S = 15{,}1 + 8{,}2 + 8{,}9 = 32{,}2 \text{ м}.$$

Аналогично определяем понижения в скважинах 2 и 3 (см. табл. 22).

Напор подземных вод над кровлей водоносного пласта в естественных условиях был 60 м. Таким образом, при эксплуатации водозабора в течение 10 000 суток уровни воды в водозаборных скважинах не снизятся до кровли пласта.

Как указывалось, если длина мульды значительно превосходит ее ширину, то расчет эксплуатационных запасов производится применительно к схеме пласт-полоса. Понижение уровня воды в скважине при работе ее как одиночной находится по формуле (IV, 48):

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi km} \left(\ln \frac{0{,}16B}{r_c \cdot \sin \frac{\pi l}{B}} + \frac{3{,}55\sqrt{at}}{B} \right),$$

где B — ширина полосы, т. е. ширина мульды;

l — расстояние скважины до ближайшей границы мульды (граница образована водоупорными породами).

Расчеты понижения уровня в скважинах группового водозабора, состоящего из ряда скважин, пересекающих «пласт-полосу», производятся по формуле (XV, 3), а при расположении ряда вдоль полосы — по формуле (IV, 55). Применение этих формул показано на примерах в гл. XV.

Глава XII

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В КАРСТОВЫХ РАЙОНАХ

Своеобразие гидрогеологических условий карста определяет особенности методики их изучения для оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

Пласты горных пород в районах развития типичного карста в фильтрационном отношении крайне неоднородны. Наряду с зонами, водопроницаемость которых чрезвычайно велика, имеются участки, обладающие ничтожными коэффициентами фильтрации. Такая неоднородность особенно характерна для районов, в которых карстовые процессы интенсивно продолжаются и в настоящее время. В тех случаях, когда вода движется в закарстованном массиве отдельными подземными водотоками, имеющими иногда затрудненную гидравлическую взаимосвязь, само понятие о фильтрации, а следовательно, и о коэффициенте фильтрации становится весьма условным.

Несмотря на большую фильтрационную неоднородность карста, все же наблюдаются некоторые общие закономерности, учет которых необходим для рационального выбора участков расположения водозаборов.

Наибольшая проницаемость карста свойственна зоне, в пределах которой происходят ежегодные колебания уровня подземных вод. Атмосферные осадки просачиваются по трещинам с большой скоростью и заполняют емкость, освобожденную в предшествующий период низкого стояния зеркала подземных вод. В зоне колебаний уровня воды очень слабоминерализованы, а потому являются активными растворителями пород.

Уменьшение водопроницаемости с углублением в толщу закарстованных пород обусловлено тем, что в нижние зоны проникают воды, обогащенные карбонатом кальция, а потому как растворитель менее активные. Процессы растворения с глубиной постепенно замещаются процессами цементации трещин. Во многих случаях нижняя граница зоны закарстованных пород, характеризующихся высокой проницаемостью, является недостаточно четкой. Обычно такой границей считают горизонтальную плоскость, соответствующую базису дренирования подземных вод эрозионной сетью (с учетом переуглубления долин). Большое значение имеет также новейшая тектоника, особенно в горных районах, где ам-

плитуда вертикальных перемещений достигает большой величины. В пределах погруженных участков глубина закарстованности может быть значительно больше глубины современного эрозионного вреза.

Водопроницаемость карста изменяется также в горизонтальном направлении. Давно замечено, что наибольшая водообильность наблюдается в зонах, примыкающих к речным долинам, а при удалении от рек закарстованность пород существенно уменьшается. Эта закономерность обусловлена тем, что в паводки происходит выщелачивание пород слабоминерализованной речной водой при ее фильтрации в берега и увеличением градиентов потока в приречных зонах.

Карст содержит трещины и пустоты самых различных размеров — от отдельных крупных каналов и пещер до тонких волосных трещин. Общий объем пустот в карсте составляет, однако, весьма небольшой процент от объема водоносного пласта или массива, поэтому повышения уровней подземных вод после выпадения осадков достигают значительной величины (иногда до 15—20 *м*), что приводит к резкому увеличению напорных градиентов и увеличению дебита источников.

Подземные воды карста немедленно реагируют на выпадение атмосферных осадков или на изменения горизонтов воды в реках. Это обстоятельство следует учитывать при определении исходных (статических) уровней подземных вод, от которых производится отсчет понижений при эксплуатации.

Одним из основных методов оценки эксплуатационных запасов подземных вод карста является балансовый метод, поэтому предварительно гидрогеологической съемкой должен быть охвачен весь район, в пределах которого должен определяться баланс подземных вод. Границами такого района служат контуры области питания и стока подземных вод. Обычно это долины рек, сток которых поглощается карстом, и долины, где происходит разгрузка подземного потока. Если балансовый район имеет значительные размеры (порядка сотен квадратных километров), то можно ограничиться съемкой масштаба 1 : 100 000. При небольших размерах района или сложном его строении съемка должна производиться в масштабе 1 : 50 000 или 1 : 25 000. Участки выхода родников, которые предполагается каптировать для водоснабжения или вблизи которых намечается заложить эксплуатационные скважины, следует картировать более детально (в масштабах 1 : 10 000—1 : 5000).

При съемке необходимо установить:

1) геологическую историю района (для суждения о глубине закарстованности пород);

2) положение наиболее раскарстованных зон, связь их с тектоникой и геоморфологией района;

3) положение участков наиболее интенсивного питания подземных вод атмосферными осадками и поверхностными водотоками;

4) направление подземного потока и положение областей и зон разгрузки.

Гидрогеологическую съемку целесообразно сопровождать геофизическими исследованиями (электроразведка, сейсморазведка), которые могут дать ценный материал о распространении наиболее закарстованных зон и глубине карстования.

На реках, протекающих через район, следует организовать гидрометрические наблюдения за стоком. Эти данные необходимы для составления водного баланса района и оценки восполняемости естественных запасов подземных вод при эксплуатации. Гидрометрические створы должны быть расположены выше и ниже участков, где по гидрогеологическим данным предполагается поглощение воды из рек или питание их подземными водами. Наблюдения необходимо производить минимум в течение года, причем важно установить процент обеспеченности стока того года, в течение которого они выполнялись. Для решения этого вопроса следует использовать гидрометрические данные по рекам с многолетним рядом наблюдений.

Наблюдения за режимом подземных вод производятся на источниках и по всем скважинам, которые бурятся при съемке и при разведке. Изучение режима важно с нескольких точек зрения. Сопоставление изменений уровней карстовых вод и дебитов источников во времени с метеорологическими данными позволяет уточнить водобалансовые расчеты. Так, в периоды выпадения большого количества осадков или после снеготаяния по изменению дебита источников (а в тех случаях, когда подземные воды дренируются рекой, — по изменению расхода реки) можно получить представление о величине коэффициента инфильтрации осадков. Если по данным наблюдений за режимом подземных вод известны снижения депрессионных кривых в периоды отсутствия питания, то, зная дебит источников или расход реки за это время, можно определить водоотдачу пласта или массива закарстованных пород, что очень важно для оценки естественных запасов подземных вод.

По данным о колебаниях уровней подземных вод можно судить об изменении отметок динамических уровней воды в скважинах водозабора при эксплуатации в характерные периоды года (снеготаяние, выпадение большого количества осадков, прекращение питания и т. п.). Наконец, большая амплитуда колебаний уровня подземных вод является признаком, указывающим на расположение наиболее проницаемых, собирающих подземный сток карстовых трактов.

После производства гидрогеологической съемки выбираются наиболее благоприятные для размещения водозаборов участки. Если таких участков выявлено несколько, то на каждом из них производятся предварительная разведка и опытные откачки, после чего производится окончательный выбор участка (или участков) для детальной разведки. Учитывая, что закарстованность

пород во многих случаях уменьшается с удалением от реки, дренирующей подземный поток, для выбора участка целесообразно заложить один-два разведочных поперечника в направлении, перпендикулярном долине, и опробовать скважины с помощью опытных откачек.

Наиболее выгодно водозаборы располагать в зонах наибольшей закарстованности пород, так как здесь скважины будут работать с меньшими понижениями уровня. Сильно закарстованные зоны являются естественными дренами, глубоко врезанными в массив и привлекающими к себе как коллекторы подземную воду из менее проницаемых участков этого массива. Пересечение зон повышенной закарстованности с поверхностью земли отмечается мощными сосредоточенными карстовыми источниками или существенным приращением расхода реки, дренирующей подземные воды. Заложение водозаборов вблизи источников при прочих равных условиях наиболее благоприятно, так как источники являются своего рода индикатором зон повышенной трещиноватости.

Водозаборы вообще целесообразно приурочивать к понижениям рельефа (ложбины, долины, овраги, замкнутые впадины) по следующим соображениям. Обычно эти понижения развиваются там, где закарстованность пород наибольшая, так как процессы карстования создают предпосылки для эрозии, возникновения провалов поверхности и т. п. Вместе с тем к этим понижениям стекают дождевые и талые воды, что усиливает поглощение осадков и вызывает интенсивное локальное карстование.

Выявленные зоны наибольшей раскарстованности пород при детальной разведке должны быть оконтурены. Сосредоточение эксплуатационных скважин в пределах таких зон, несмотря на значительное взаимодействие скважин, дает больший эффект нежели увеличение длины водозабора с захватом относительно слабопроницаемых участков.

Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод карста применяются совместно гидравлический и балансовый методы. Первый позволяет определить дебит скважин, зависящий от водопроводимости пласта, второй — восполняемость запасов. Что касается гидродинамического метода, то его применимость ограничивается условиями, когда закарстованность пород более или менее равномерна. В таких случаях принципиального отличия между водами карста и «обычными» грунтовыми водами нет и описанная методика оценки запасов применима и для карстовых районов.

Подземные воды карста обычно безнапорные, следовательно, при их эксплуатации происходит осушение пласта. Водопроницаемость пород по вертикали сильно изменяется, поэтому экстраполяция кривой дебита применительно к большему (эксплуатационному) дебиту может приводить к серьезным ошибкам. В связи с этим опытные откачки следует по возможности производить

с расходом, равным дебиту, с которым предполагается эксплуатировать скважину или даже превышающим его (учитывая дополнительное понижение при взаимодействии). Если по техническим причинам этого добиться откачкой из одной скважины невозможно (недостаточная производительность насосов), то следует заложить в непосредственной близости еще одну-две скважины и вести откачку из них одновременно.

Коэффициенты уровнепроводности закарстованных пород обычно значительны (10^4—10^5 *м²/сутки*), поэтому эффект взаимодействия скважин (срезки) при опытных откачках, производящихся в течение нескольких суток, является достаточно характерным.

Опытные откачки по возможности следует приурочить к тому периоду года, когда водоносный горизонт не получает питания инфильтрацией атмосферных осадков, так как в это время движение подземных вод приближается к установившемуся. При оценке эксплуатационных запасов суммарное понижение должно отсчитываться от самого низкого положения статического уровня, установленного наблюдениями за режимом подземных вод на участке водозабора.

Гидравлические расчеты понижений уровней воды в скважинах при эксплуатации, основанные на опытных откачках, не характеризуют обеспеченности эксплуатационных запасов во времени. Для получения доказательства обеспеченности запасов должно быть оценено питание (естественные ресурсы) водоносного горизонта балансовыми методами.

О величине питания подземных вод можно судить как по приходной части их баланса (инфильтрация атмосферных осадков, поглощение воды из рек), так и по расходной части (подземный сток в реки, дебиты родников). В целях взаимного контроля следует определить обе части баланса, так как сходимость их величин служит подтверждением правильности определения естественных ресурсов водоносного горизонта. При балансовых расчетах необходимо возможно полнее использовать данные о режиме подземных вод для характеристики изменения питания во времени. Если район имеет типичный карстовый рельеф с характерными замкнутыми формами, способствующими поглощению атмосферных осадков, то при отсутствии водоупорных слоев в кровле закарстованных пород можно ориентировочно считать, что инфильтрация и инфлюация воды составляет не менее 50—60% от количества выпадающих осадков.

Если водоносный горизонт в карсте напорный и эксплуатацию подземных вод предполагают вести без осушения водоносного пласта, то методика оценки эксплуатационных запасов та же, что и для артезианских вод.

Глава XIII

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В КОНУСАХ ВЫНОСА И ПРОЛЮВИАЛЬНЫХ ШЛЕЙФАХ

На склонах гор широкое распространение имеют конусы выносов и покровы (шлейфы), сложенные пролювиальными отложениями, к которым приурочены весьма обильные водоносные горизонты. В этих районах в направлении от гор к равнине можно выделить несколько типичных зон, резко отличающихся по гидрогеологическим условиям питания, циркуляции и разгрузки подземных вод.

В верхней части склона пролювиальные отложения представлены галечниками, имеющими большую водопроницаемость. Это основная область питания подземных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков, поглощения стекающих с горных склонов временных водотоков, поглощения рек, притока воды из коренных пород. Подземные воды в этой зоне имеют свободную поверхность.

Следующая зона характеризуется чередованием слоев галечников и суглинков, причем суглинки постепенно замещаются галечниками по мере движения от гор к равнине. Единый водоносный горизонт в области питания расчленяется на несколько этажнорасположенных горизонтов. Чем глубже залегает водоносный горизонт, тем более затруднена его разгрузка. Поэтому по мере углубления в толщу пролювиальных отложений пьезометрические отметки подземных вод возрастают, что вызывает движение воды не только по простиранию пластов, но и поперек их снизу вверх через слабопроницаемые слои суглинков.

Если водоносные горизонты выклиниваются, то на контакте с суглинками, образующими как бы непроницаемый барьер, происходит частичная разгрузка подземных вод восходящими источниками (рис. 50). В других случаях водоносные горизонты распространяются на большое расстояние в пределах предгорной равнины, все более погружаясь. Галечники замещаются песками, мощность водоносных горизонтов уменьшается, минерализация воды все более возрастает.

Разгрузка водоносных горизонтов в этом случае происходит на значительной площади путем восходящего движения к поверхности земли, где происходит испарение грунтовых вод (рис. 51). Эти гидродинамические условия обусловливают характерную обращенную вертикальную зональность подземных вод — их мине-

рализация в верхних горизонтах и особенно у поверхности земли значительно больше, чем в слоях, залегающих на большой глубине.

Подземные зоны пролювиальных отложений наиболее целесообразно использовать в пределах зоны переслаивания галечников и суглинков. В верхней части склона подземные воды приурочены к весьма проницаемым галечникам, но залегают на большой

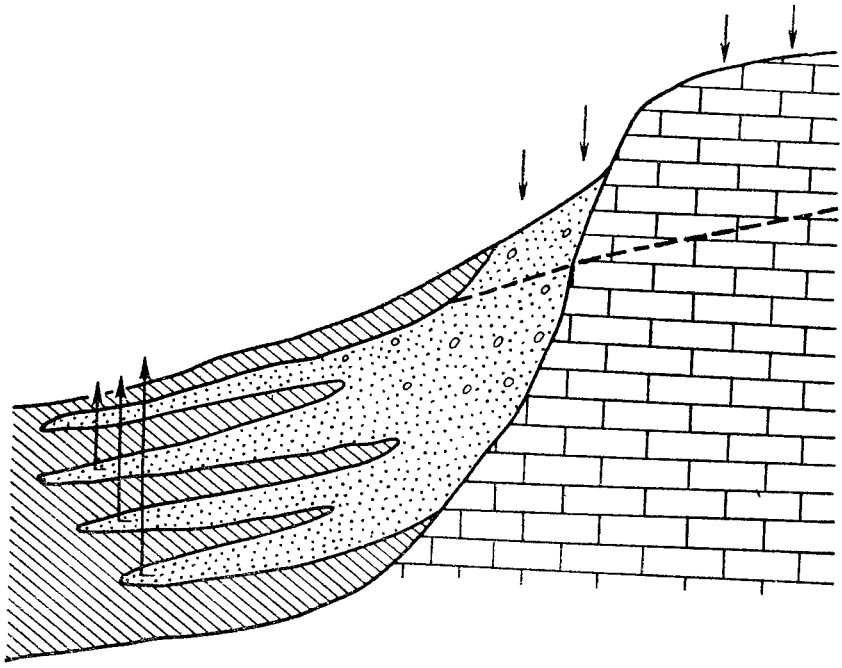


Рис. 50.

глубине, поэтому их эксплуатация экономически нецелесообразна, а в некоторых случаях при современном насосном оборудовании и технически невозможна.

С другой стороны, устройство водозабора у подножия склона может оказаться также нерациональным, учитывая, что по мере удаления от горного хребта увеличивается число и мощность прослоев суглинков (иногда они полностью слагают разрез) и одновременно уменьшаются коэффициенты фильтрации водоносных слоев (галечники постепенно замещаются песками). Вследствие этого скважины, несмотря на увеличение напоров над поверхностью земли, оказываются малодебитными, фильтры засоряются песком.

Гидрогеологические условия изменяются не только вниз по склону, но и вдоль склона. В конусах выноса наибольшая проницаемость свойственна осевой зоне, к периферии конуса литологические условия ухудшаются. Если конусы выноса слились в единый пролювиальный шлейф, то по линии, идущей вдоль склона,

т. е. примерно по горизонтали, участки с большей проницаемостью чередуются с участками, на которых водопроницаемость значительно меньше. Пролювиальные шлейфы, образовавшиеся в результате площадного смыва, характеризуются изменчивостью геологического строения в этом направлении.

Одной из главных задач гидрогеологических изысканий в районах конусов выноса является выбор оптимального участка расположения водозабора. При этом должны быть приняты во внима-

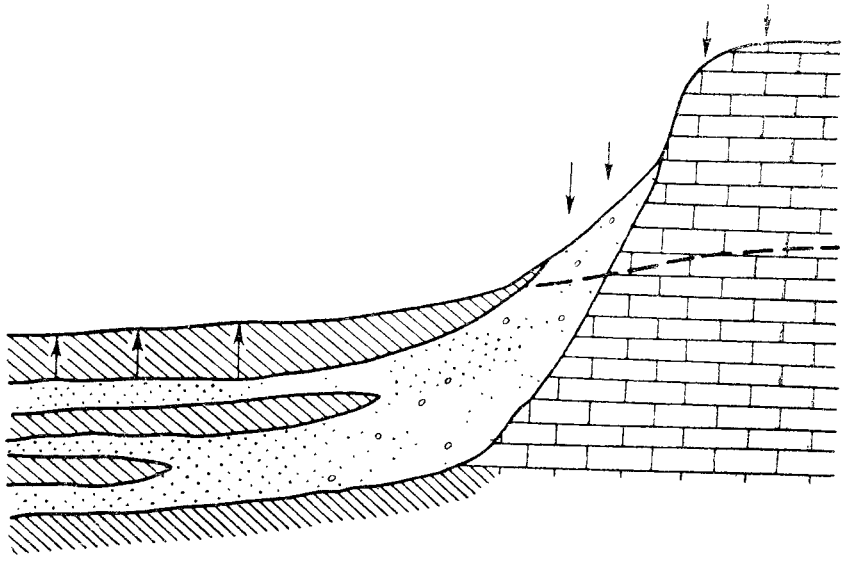


Рис. 51.

ние обе указанные закономерности — изменение мощности и водопроницаемости пластов и распределение напоров.

Поисковые работы в данных районах заключаются в проведении гидрогеологической съемки масштаба 1 : 25 000—1 : 100 000. Съемкой должна быть охвачена вся площадь распространения конуса выноса и прилежащая зона коренных пород. В пределах пролювиальных шлейфов, протягивающихся иногда на десятки километров вдоль склона, участок съемки может быть ограничен.

При проведении гидрогеологической съемки устанавливаются:

1) расположение конусов и межконусных участков;

2) закономерности строения пролювиальных отложений, распределение водоносных горизонтов и напоров подземных вод по направлению вниз по склону на разных глубинах;

3) границы области питания подземных вод атмосферными осадками, т. е. области, где галечники выходят на поверхность;

4) участки, на которых происходит поглощение поверхностного стока в пролювиальные отложения, и характер питания водоносного горизонта (непосредственная гидравлическая связь водотоков и подземных вод или поглощение через заиленные русла в виде «подземного дождя»);

5) условия разгрузки водоносных горизонтов (разгрузка источниками, выходящими в подошве склона, разгрузка испарением);

6) водоносность коренных пород, к которым примыкают пролювиальные отложения, и степень участия их в питании подземных вод пролювиальных отложений.

Выяснение основных закономерностей гидрогеологических условий конусов выноса и пролювиальных шлейфов требует проведения довольно значительного объема буровых работ в целях выбора участков для последующих детальных разведок. Бурение скважин следует производить по направлениям, по которым изменение гидрогеологических условий наиболее существенно, что позволит при минимуме объема работ получить наиболее эффективные результаты.

Предварительная разведка начинается заложением створа скважин в направлении от гор к равнине. На конусах выноса поперечники следует приурочивать к их осевым зонам. Число скважин в створе примерно три-пять в зависимости от размеров конуса выноса. Затем по линии, по которой условия заложения водозабора представляются наиболее благоприятными, разбуривается створ скважин в направлении, перпендикулярном осевому створу. При бурении должно быть установлено распределение напоров подземных вод в этажнорасположенных водоносных горизонтах; из всех скважин произведены пробные откачки, а из тех, которые располагаются на участках возможного размещения водозаборов, — опытные откачки.

Мощность пролювиальных отложений очень велика и во многих случаях измеряется сотнями метров. Однако устройство водозаборных скважин столь большой глубины обычно нецелесообразно, так как при эксплуатации сравнительно неглубоко залегающих водоносных горизонтов возникает (или усиливается) перетекание воды из глубоких горизонтов через разделяющие относительно слабопроницаемые слои суглинков. Следовательно, более глубокие горизонты косвенно принимают участие в питании водозабора, и нет необходимости их эксплуатировать непосредственно. В связи с этим при изучении гидрогеологических условий конусов выноса можно ограничиться бурением скважин глубиной порядка 100—200 *м*, и только в тех случаях, когда водопроницаемость пород на этих глубинах незначительна и не может обеспечить требуемых дебитов скважин, целесообразно производить более глубокое бурение.

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод конусов выноса и пролювиальных шлейфов большое значение имеют наблюдения за режимом подземных вод, на основе которых можно решить вопрос об основных источниках питания водоносных горизонтов пролювиальных отложений (приток из области распространения коренных пород, местное питание). Для этого данные об изменениях напоров подземных вод и дебитов источников сопо-

ставляются с метеорологическими и гидрологическими данными и находятся кореллятивные связи между ними.

Уровни подземных вод в пролювиальных отложениях, имеющих местное питание, подвержены значительным колебаниям в годовом цикле. Наблюдения за режимом подземных вод должны дать представление о минимальных, средних и максимальных уровнях, а также о дебитах источников, что крайне важно для суждения об обеспеченности эксплуатационных запасов. Наблюдения должны быть поставлены, как минимум, по створам скважин, расположенных по направлению от гор к равнине, а также на источниках. Длительность наблюдений должна быть не менее года.

После проведения гидрогеологической съемки и предварительной разведки выбирается наиболее благоприятный участок (или участки) для производства на них детальной разведки.

Разведочные работы следует производить применительно к предполагаемой схеме размещения водозабора. Для эксплуатации подземных вод пролювиальных отложений наиболее рационально располагать скважины по линиям, идущим вдоль склона, т. е. примерно по горизонтали. Вначале разведка ведется с большими расстояниями между скважинами для уточнения места расположения водозабора. После производства предварительной разведки особых «неожиданностей» при детальной разведке предполагать нет оснований, поэтому бурение следует производить с таким расчетом, чтобы в дальнейшем использовать разведочные скважины как эксплуатационные. Это тем более желательно, что скважины имеют обычно значительную глубину, а поэтому ликвидация их после проведения разведки нецелесообразна.

Для определения длины участка разведочных работ необходимо сделать предварительные «прикидки» по приводимым ниже формулам, задаваясь вероятными значениями коэффициента фильтрации пород и мощности водоносного пласта. В качестве ориентировки могут служить данные пробных и опытных откачек из скважин, пробуренных при съемке и на стадии предварительной разведки, а также учитываться аналогия с другими участками.

Откачки, производящиеся для построения кривых дебита и определения гидрогеологических параметров, производятся по обычной методике. Если скважина фонтанирует, то она должна быть оборудована задвижкой или крановым устройством, обеспечивающим постоянство дебита скважины. Величина понижения напора при этом определяется по манометру. Опытные откачки должны производиться из скважин последовательно, с наблюдениями за понижениями уровня в других скважинах, что позволяет наиболее точно определить расчетные параметры. В этих же целях после проведения откачек следует производить наблюдения за восстановлением уровня.

Методика оценки эксплуатационных запасов определяется типом граничных условий, которые в конусах выноса и пролювиаль-

ных шлейфах достаточно сложны. Контуром питания отдельного конуса выноса могут считаться образовавшие его водотоки, из которых фильтрация является основным источником питания подземных вод. За многолетний период среднюю величину фильтрации из водотоков допустимо считать примерно постоянной, хотя изменения ее в течение года могут быть весьма значительными. Обычно русла водотоков, растекающихся по конусу выноса, в той или иной мере заилены, поэтому непосредственная гидравлическая связь поверхностных и подземных вод отсутствует и питание в основном происходит путем просачивания воды через зону аэрации с неполным заполнением пор. Такое питание с гидродинамической точки зрения аналогично инфильтрации атмосферных осадков.

Другим источником питания является приток воды из коренных пород, если последние обладают значительной водопроницаемостью (массивы закарстованных пород, зоны разлома с повышенной трещиноватостью). Если коренные породы имеют значительную водопроницаемость, соизмеримую с проницаемостью пролювиальных отложений, то поток можно считать практически неограниченным. В тех случаях, когда коренные породы слабопроницаемы, то притоком из них можно пренебречь и рассматривать его как ограниченный с постоянным расходом на верховой границе.

Низовая граница потока выражается либо выходом источников у подножия склона, либо удалена на значительное расстояние, если подземный поток продолжает двигаться по водопроницаемым слоям в пределах равнины, постепенно разгружаясь в результате восходящего движения и испарения.

Если поток «отжимается» барьером суглинков, на контакте с которыми выходят источники, то на его границе при эксплуатации водозабора создаются весьма сложные граничные условия. Первое время, пока при откачке из скважин источники не иссякли, условия на границе характеризуются постоянством напора и изменяющимся (уменьшающимся) расходом, а после исчезновения источников — изменяющимся (падающим) напором и постоянством, равным нулю расходом.

Если выходов источников в основании склона нет и водоносные горизонты имеют значительное распространение в равнинной области, то поток может рассматриваться с низовой границы как неограниченный и оценка эксплуатационных запасов производится по методике, применяемой для артезианских бассейнов. Влияние другой границы (причленение пролювиальных отложений к коренным породам) в этих условиях менее существенно.

Остановимся на схеме, когда разгрузка подземного потока происходит источниками, располагающимися по линии контакта водоносных слоев с суглинками, образующими фильтрационный барьер. При приближении водозабора к этому барьеру условия работы водозабора ухудшаются, так как линии токов, огибающие скважины, сближаются, и поток, поступающий к скважине, испы-

тывает дополнительные сопротивления. На рис. 52 показано положение линий токов при откачке воды из скважины в неограниченном пласте (*а*) и вблизи водоупорного барьера (*б*).

Чем длиннее ряд скважин и чем меньше расстояния между ними, тем эти сопротивления больше. Если ряд скважин имеет большую протяженность (теоретически бесконечный), то при длительной эксплуатации водозабора приток со стороны барьера прекратится и для оценки обеспеченности эксплуатационных запасов можно исходить из предположения, что водозабор заложен непосредственно на контакте с барьером суглинков. Очевидно, что такой расчет дает нижний предел эксплуатационных запасов, так как не учитывает поступления воды к торцевым участкам ряда, поэтому определенные таким путем эксплуатационные запасы следует рассматривать как минимальные. В ряде случаев при относительно небольшой потребности в воде определение минимальных эксплуатационных запасов достаточно как обоснование обеспеченности требуемого водопотребления.

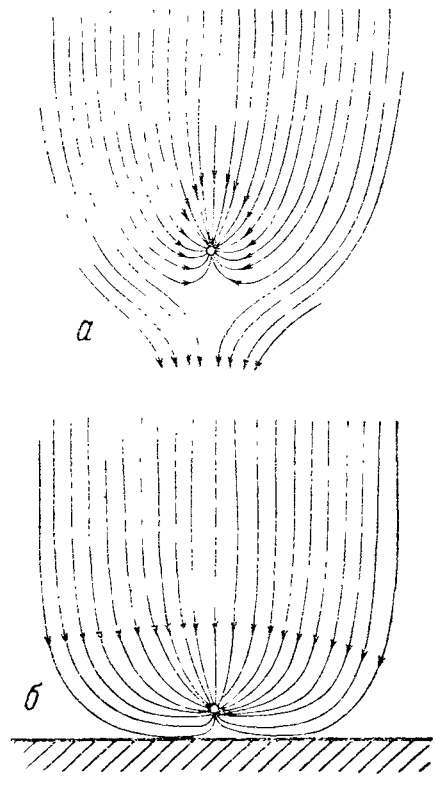


Рис. 52.

Приток воды к «бесконечному» ряду скважин, заложенных на контакте с водоупором, равен половине того притока, который этот ряд получал бы при двустороннем питании.

Учитывая это, на основе формулы Маскета—Лейбензона приток воды к каждой скважине ряда выразится:

$$Q = \frac{\pi k m S}{\ln \frac{\lambda}{2\pi r_0} + \frac{\pi l}{\lambda}}, \qquad \text{(XIII, 1)}$$

где λ — расстояние между скважинами;
l — расстояние от водозабора до области питания.

Если бы забор воды осуществлялся совершенной галереей, имеющей длину λ, то ее расход выразился бы:

$$Q = \frac{k m S_{гал} \lambda}{l}, \qquad \text{(XIII, 2)}$$

где $S_{гал}$ — понижение уровня воды в галерее.

Из (XIII, 1) и (XIII, 2) получим:

$$a = \frac{S}{S_{гал}} = 1 + \frac{\lambda}{\pi l} \cdot \ln \frac{\lambda}{2\pi r_0}. \qquad \text{(XIII, 3)}$$

Если, например, принять расстояние между скважинами $\lambda = 200$ *м*, а диаметр скважин $r_0 = 0{,}15$ *м*, то значения коэффициента a выразятся:

при $l = 2\,000$ *м* $\quad a = 1{,}17$;
„ $l = 5\,000$ *м* $\quad a = 1{,}07$;
„ $l = 10\,000$ *м* $\quad a = 1{,}03$.

Следовательно, при более или менее удаленной области питания вблизи барьера с суглинками понижения уровней воды в галерее и в скважинах отличаются очень мало, так как сопротивления вблизи скважин относительно невелики по сравнению со всей областью фильтрации, где поток является плоским.

Принципиальное различие притока воды к водозабору в неограниченном пласте и в потоке, замыкающемся барьером, заключается не только в том, что в первом случае приток к галерее двусторонний, а во втором — односторонний. Барьер играет и положительную роль, так как является как бы подземным барражем, препятствующим оттоку воды ниже водозабора и обеспечивающим полный захват его водозабором.

В самом деле, если ряд скважин заложен вблизи барьера, где выходят источники, то при каптаже этих источников расход естественного потока может быть забран без всякого понижения. Поэтому, если скважины работают с тем или иным понижением, осушая источники, то понижение будет пропорционально не эксплуатационному расходу скважин (Q), а разности между этим расходом и естественным расходом (Q_e), захватываемым скважиной на фронте шириной λ.

Поэтому в формулу (XIII, 1) надо подставить вместо Q разность $Q - Q_e$.

По формуле Дарси

$$Q_e = km\,i, \qquad \text{(XIII, 4)}$$

где i — уклон естественного потока.

Как уже указывалось, на верховой границе потока могут иметь место два типа граничных условий: а) пролювиальные отложения примыкают к водопроницаемым коренным породам; б) пролювиальные отложения примыкают к водоупорным коренным породам.

В первом случае поток может рассматриваться как неограниченный с верховой стороны. Сопротивления в зоне, примыкающей к водозабору, при длительной эксплуатации очень малы по сравнению с сопротивлениями в потоке в целом и на незначительном расстоянии от водозабора поток сохраняется плоским. Поэтому понижение уровня воды в скважинах линейного ряда неограни-

ченной длины при одностороннем притоке из «бесконечности» может быть выражено формулой Дюпюи для плоского потока с подстановкой в нее приведенной величины дальности действия горизонтальной дрены ($L_п$):

$$S_{гал} = \frac{Q - Q_e}{km\lambda} L_п. \qquad \text{(XIII, 5)}$$

Из теории фильтрации известно, что в плоском потоке при постоянном расходе откачиваемой воды приведенная дальность действия дрены выражается:

$$L_п = 1{,}12\sqrt{at}. \qquad \text{(XIII, 6)}$$

Из формул (XIII, 4) и (XIII, 5) получим:

$$S_{гал} = \left(\frac{Q}{km\lambda} - i\right) L_п. \qquad \text{(XIII, 7)}$$

Пример расчета. Для получения 60 000 *м³/сутки* воды предполагается заложить 10 скважин с расстояниями между ними $\lambda = 300$ *м*, радиус каждой скважины $r_0 = 0{,}10$ *м*. Гидрогеологические данные: вскрытая мощность пластов галечника $m = 100$ *м*, коэффициент фильтрации $k = 50$ *м/сутки*, коэффициент пьезопроводности $a = 10^4$ *м²/сутки*, уклон естественного потока $i = 0{,}0015$, напор над кровлей водоносного пласта 40 *м*.

Расчет понижений уровней воды в скважинах требуется провести на срок 10^4 суток (около 27 лет). Находим:

по формуле (XIII, 6)

$$L_п = 1{,}12\sqrt{10^4 \cdot 10^4} = 11\,200 \text{ м};$$

по формуле (XIII, 7)

$$S_{гал} = \left(\frac{6000}{50 \cdot 100 \cdot 300} - 0{,}0015\right) \cdot 11\,200 = 28 \text{ м}.$$

Для перехода от понижения в галерее к понижениям в скважинах воспользуемся формулой (XIII, 3):

$$a = 1 + \frac{300}{3{,}14 \cdot 11\,200} \ln \frac{300}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}1} = 1{,}05.$$

Таким образом, при эксплуатации водозабора в течение 27 лет напор над кровлей водоносного пласта (40 *м*) будет снижен на $S = a \cdot S_{гал} = 1{,}05 \cdot 28 = 29{,}4$ *м*, т. е. осушения водоносного пласта не произойдет.

При расчетах по формуле (XIII, 7) пренебрегается притоком воды к водозабору за счет сработки естественных запасов в области питания, где подземные воды являются безнапорными. Между

тем при значительной ширине зоны питания этот фактор может иметь весьма существенное значение. Расчет понижения уровня воды в галерее с учетом осушения пласта в области питания можно производить по формуле, аналогичной (XI, 3):

$$S_{\text{гал}}=\frac{(Q-Q_{\text{e}})\,l}{km\lambda}+\frac{(Q-Q_{\text{e}})\,t}{\lambda\left(\mu l_1+\frac{km}{a}l_2\right)}\,; \qquad \text{(XIII, 8)}$$

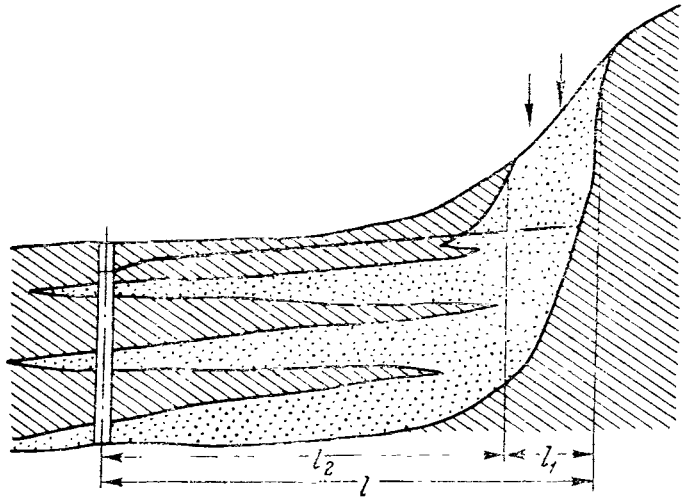


Рис. 53.

или, учитывая (XIII, 4):

$$S_{\text{гал}}=\left(\frac{Q}{km\lambda}-i\right)\left(l+\frac{t}{\frac{\mu l_1}{km}+\frac{l_2}{a}}\right), \qquad \text{(XIII, 9)}$$

где μ — водоотдача пород в области питания;

l — расстояние от линии водозабора до контакта пролювия с коренными породами (рис. 53);

l_1 — ширина полосы области питания;

l_2 — ширина зоны распространения напорных вод.

Пример расчета. Требуется определить понижение уровней воды в скважинах водозабора линейного типа, расположенных вблизи контакта водоносного пласта с суглинками по следующим данным. На расстоянии $l=8000$ *м* от водозабора пролювиальные галечники примыкают к водоупорным коренным породам. Водоносный горизонт получает питание за счет поглощения поверхностного стока и инфильтрации атмосферных осадков в верхней части шлейфа; ширина области питания $l_1=2000$ *м*, ширина области напорного движения $l_2=6000$ *м*. Водоотдача галечников $\mu=0{,}2$, суммарная мощность водоносных горизонтов в галечниках в зоне напорного движения $m=100$ *м*, коэффициент фильтрации галечников 50 *м/сутки*, коэффициент пьезопроводности

$a=10\,000$ *м*²/*сутки*. Уклон естественного потока $i=0{,}001$, расстояние между скважинами $\lambda=300$ *м*, расход скважины $Q=3000$ *м*³/*сутки*, радиус скважины $r_0=0{,}15$ *м*, время эксплуатации $t=10\,000$ суток.

По формуле (XIII, 9) находим понижение уровня воды в галерее

$$S_{\text{гал}}=\left(\frac{3000}{50\cdot 100\cdot 300}-0{,}001\right)\left(8000+\frac{10\,000}{\frac{0.2\cdot 2000}{50\cdot 100}+\frac{6000}{10\,000}}\right)=22{,}7\ м.$$

Определяем по формуле (XIII, 3) переходный коэффициент

$$a=1+\frac{300}{3{,}14\cdot 8000}\ln\frac{300}{2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}15}=1{,}08.$$

Следовательно, понижение уровней воды в скважинах через 10 000 суток от начала эксплуатации составит:

$$S=1{,}08\cdot 22{,}7=24{,}5\ м.$$

Приведенные выше формулы относятся к случаю, когда водозабор линейного типа состоит из большого числа скважин и рассматривается как отрезок «бесконечного» ряда скважин. Это допущение приводит к преувеличению понижений в скважинах, так как исходит из схемы плоско-параллельного, а не радиального течения, которое в действительности имеет место на конечных участках ряда. Следовательно, если понижение, определенное расчетами по схеме «бесконечного» ряда, не превышает допустимого по условиям эксплуатации, то это может рассматриваться как доказательство обеспеченности запасов.

При небольшом числе скважин и значительном удалении их от барьера расчет по формулам «бесконечного» ряда может приводить к существенному преувеличению понижений и в ряде случаев к принципиально неправильным выводам (например, требованию увеличения числа скважин и удлинения линии водозабора). Более точно в этих случаях производят расчет на основе формулы (XIII, 10):

$$S=\frac{1}{2\pi km}[2Q_{\text{сум}}\ln R_{\text{п}}-(Q\ln 2r_0l+Q_1\ln r_1\rho_1+\ldots+Q_n\ln r_n\rho_n)],\quad (\text{XIII, 10})$$

где $Q_{\text{сум}}$ — дебит всех скважин водозабора;

Q — дебит той скважины, в которой определяется понижение уровня;

l — расстояние этой скважины до водоупорной границы;

$r_1,\ldots,r_n$ — расстояние скважины до других скважин водозабора, имеющих соответственно дебиты $Q_1,\ldots,Q_n$;

$\rho_1,\ldots,\rho_n$ — расстояния до отображенных скважин.

Расходы скважин определяются по данным опытных откачек с экстраполяцией по кривым дебита.

Расчеты понижений по формуле (XIII, 10) не учитывают расхода естественного потока, который до устройства водозабора проходил транзитом, а при эксплуатации скважин благодаря барьеру, образуемому водоупорными породами, используется водозабором. Поэтому действительное понижение в скважине S будет несколько меньше вычисленного по формуле (XIII, 10), что можно учесть, введя коэффициент γ, пользуясь соотношением:

$$\gamma = \frac{Q_{сум} - Q_e}{Q_{сум}}. \qquad \text{(XIII, 11)}$$

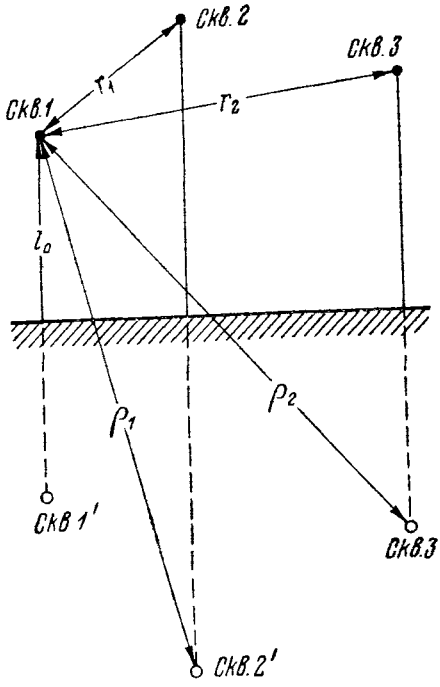


Рис. 54.

Для определения действительного понижения уровня воды в скважине следует помножить на этот коэффициент величину понижения, определенного по формуле (XIII, 10).

Расход естественного потока определяется по формуле

$$Q_e = kmBi, \qquad \text{(XIII, 12)}$$

где B — ширина фронта потока;
i — напорный градиент (уклон) потока.

Минимальное значение ширины фронта потока — это длина водозабора по гидроизопьезе, проходившей через участок в естественных условиях.

Пример расчета. Требуется определить понижение в трех взаимодействующих скважинах, расположенных вблизи непроницаемого контура в нижней части пролювиального шлейфа. Высота напора над кровлей 50 *м*, мощность водоносного горизонта $m = 50$ *м*, коэффициент фильтрации $k = 20$ *м/сутки*, радиус скважин $r_0 = 0{,}15$ *м*, продолжительность эксплуатации $t = 10^4$ суток. Уклон естественного потока $i = 0{,}002$, коэффициент пьезопроводности $a = 2 \cdot 10^4$ *м*^{2}*/сутки*.

Дебиты скважин, их расположение и расстояния между ними и до непроницаемого контура приведены в табл. 23 и на рис. 54.

Ширину фронта естественного потока (B), перехватываемого водозабором, примем равной длине линии водозабора по гидроизопьезе, т. е. $B = 800$ *м*.

Таблица 23

Скважины	Дебиты скважин, $м^3/сутки$	Расстояние до непроницаемого контура, $м$	Расстояние до других скважин, $м$			Расстояние до отображаемых скважин, $м$		
			Скв. 1	Скв. 2	Скв. 3	Скв. 1	Скв. 2	Скв. 3
1	6000	400	—	500	806	—	1237	1204
2	5000	800	500	—	584	1237	—	1393
3	8000	500	806	584	—	1204	1393	—

$$Q_{сум} = 6000 + 5000 + 8000 = 19\,000 \ м^3/сутки;$$

$$R_п = 1{,}5\sqrt{2 \cdot 10^4 \cdot 10^4} = 2{,}12 \cdot 10^4 \ м.$$

Определяем понижение уровня воды в скв. 1 по формуле (XIII, 10)

$$S = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 20 \cdot 50}\,[2 \cdot 19\,000 \cdot \ln 2{,}12 \cdot 10^4 - (6000 \cdot \ln 2 \cdot 0{,}15 \cdot 400 +$$

$$+ 5000 \cdot \ln 500 \cdot 1237 + 8000 \cdot \ln 806 \cdot 1204)] = 27{,}5 \ м.$$

Определяем расход естественного потока по формуле (XIII, 12)

$$Q_e = 20 \cdot 50 \cdot 800 \cdot 0{,}002 = 1600 \ м^3/сутки.$$

Вычисляем по формуле (XIII, 11) коэффициент γ

$$\gamma = \frac{19\,000 - 1600}{19\,000} = 0{,}91.$$

Следовательно, действительное понижение в скважине 1 составит:

$$S = 0{,}91 \cdot 27{,}5 = 25{,}0 \ м.$$

Аналогично рассчитаны понижения в скважинах 2 и 3 (табл. 24).

Таблица 24

Скважины	Понижение уровня по формуле (XIII, 10), $м$	Действительное понижение уровня, $м$
1	27,5	25,0
2	25,8	23,6
3	29,9	27,1

Наибольшая высота снижения уровня воды в скважинах водозабора составляет менее 60% от высоты над кровлей (50 $м$), т. е. эксплуатационные запасы, которые предполагается использовать

(19 тыс. $м^3/сутки$) в этих условиях, можно считать вполне обеспеченными.

Расчеты взаимодействия скважин при отсутствии барьера суглинков и значительной водопроводимости коренных пород, к которым прислонены пролювиальные отложения, производятся применительно к схеме неограниченного пласта, т. е. по той же схеме, что и для артезианских вод.

Для приближенных расчетов понижений в скважинах при расположении их в ряд при равных дебитах скважин можно заменять

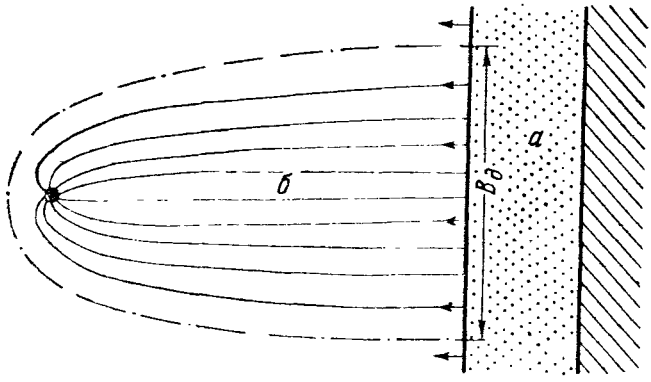


Рис. 55. Схема областей питания

а — область питания; *б* — область, в которой подземные воды приобретают напор

в расчетах группу скважин водозабора единым «большим колодцем», радиус которого определяется по формуле (IV, 23).

Изложенная методика оценки эксплуатационных запасов основывается на уравнениях неустановившегося движения подземных вод, причем в этих расчетах не учитывается влияние некоторых факторов, ограничивающих рост понижения во времени и приводящих к практической стабилизации динамических уровней в скважинах. Этими факторами являются:

1) перетекание воды через относительно слабопроницаемые слои из горизонтов, расположенных выше и ниже эксплуатируемого;

2) значительная водопроницаемость пород в зоне питания;

3) расширение области, из которой привлекаются естественные ресурсы подземных вод.

Роль перетекания как «стабилизатора» депрессионных воронок уже отмечалось. Здесь же мы лишь отметим, что в пролювиальных отложениях, где водоносные горизонты разделены суглинками, т. е. породами неводоупорными и нередко выклинивающимися, условия для перетекания достаточно благоприятны.

При большей протяженности зоны питания вдоль горного хребта стабилизация уровней воды в скважинах может произойти

по следующей причине. Когда депрессия распространится до области питания водоносного горизонта, то с течением времени зона, из которой вода движется к водозабору, будет постепенно расширяться до тех пор, пока не достигнет таких размеров, при которых дебит водозабора будет полностью компенсироваться питанием (рис. 55). Ширина этой области ($B_д$) определяется выражением:

$$B_д = \frac{Q_{сум}}{q_e}, \qquad \text{(XIII, 13)}$$

где q_e — расход подземного потока на единицу ширины его фронта;

$Q_{сум}$ — суммарный дебит водозабора.

Если водопроводность пласта в области питания значительно больше, чем в области, где водоносный пласт расчленяется прослоями суглинков и водопроницаемость пород уменьшается, то на верховой границе потока может быть принято условие постоянства напора, а область питания рассматривается как «река».

Если при этом граница потока находится на большом расстоянии от водозабора (барьер суглинков отсутствует), то понижение уровня в водозаборе, рассматриваемом как «большой колодец», выразится по Форхгеймеру:

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \cdot \ln \frac{2l}{r_к}, \qquad \text{(XIII, 14)}$$

где l — расстояние от водозабора до области питания;

$r_к$ — радиус большого колодца.

Глава XIV

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ГРУНТОВЫХ ВОД В МЕЖДУРЕЧЬЕ

В пределах равнин грунтовые воды распространены повсеместно за исключением отдельных участков, сложенных на большую глубину водоупорными породами.

Характерными чертами грунтовых вод являются их питание атмосферными осадками на большей части распространения водоносного горизонта и дренаж речными долинами в пределах той же площади. Это способствует интенсивному водообмену, благодаря чему грунтовые воды имеют незначительную минерализацию (сухой остаток, как правило, менее 1 *г/л*).

В районах аридного климата грунтовые воды обычно сильно минерализованы, а потому не могут быть использованы для хозяйственно-питьевого водоснабжения за исключением локальных участков, где имеются пресные линзы.

Естественные запасы и естественные ресурсы грунтовых вод, если их рассматривать в региональном плане, весьма значительны. Так, например, естественные запасы грунтовых вод в зоне распространения зандровых и древнеаллювиальных равнин Европейской части СССР составляют примерно 2—3 тыс. *км*^{3}, а естественные ресурсы выражаются сотнями кубометров в секунду.

Грунтовые воды широко используются для мелкого рассредоточенного водоснабжения. Вместе с тем на тех участках, где мощность и водопроницаемость водоносных пластов значительны, а условия возобновления запасов благоприятны, грунтовые воды могут обеспечить и крупное водоснабжение с расходами водозаборов порядка сотен литров в секунду и более. Однако условия эксплуатации грунтовых вод менее благоприятны, чем артезианских, так как напор над кровлей, как правило, отсутствует и при эксплуатации происходит осушение пласта, что лимитирует понижения уровней воды в скважинах.

Гидрогеологические исследования, выполняемые для оценки эксплуатационных запасов грунтовых вод, начинаются с гидрогеологической съемки. Естественными границами района, в пределах которого может распространяться влияние эксплуатации водозабора, являются реки, дренирующие грунтовые воды. В этих границах и должна производиться гидрогеологическая съемка,

масштаб которой может быть принят 1 : 50 000, а в простых гидрогеологических условиях 1 : 100 000—1 : 200 000.

При производстве гидрогеологической съемки особое внимание необходимо уделять выяснению условий залегания и питания грунтовых вод. Важно установить, имеют ли водоносные горизонты гидравлическую связь с реками, или она отсутствует, так как от этого зависит выбор расчетной схемы при оценке эксплуатационных запасов.

Необходимо выяснить также, имеется ли связь грунтовых вод с более глубоко залегающими водоносными горизонтами. Поэтому при бурении скважин, сопровождающем съемку, нельзя ограничиться доведением их до «водоупора», иногда достаточно условного, а следует пройти одной-двумя скважинами этот слой, установить его мощность и состав, а также величину напора и минерализацию воды более глубоколежащего водоносного горизонта. Если последний имеет высокую минерализацию, то при эксплуатации грунтовых вод в некоторых условиях возможно ухудшение их состава вследствие фильтрации через «окна» или непосредственно через разделяющий слабопроницаемый слой.

В области развития мощного комплекса ледниковых образований (морены, флювиогляциальные отложения) обычно имеют два-три водоносных горизонта, из которых верхний безнапорный, а другие обладают напором, определяемым условиями залегания водоупорных моренных суглинков. Водоносные горизонты нередко выклиниваются и вместе с тем имеют вертикальную гидравлическую связь через древние долины, заполненные песчаными флювиогляциальными отложениями, через окна в морене, а также непосредственно через морену, если она опесчанена.

Наиболее благоприятными следует считать те участки, на которых имеется непосредственная взаимосвязь между водоносными горизонтами. Эксплуатационные скважины целесообразно закладывать в тех горизонтах, в которых водопроводимость пласта наибольшая. В этих случаях депрессионная воронка, развивающаяся в этом горизонте, работает как пластовая дрена, привлекая к водозабору воду из других водоносных горизонтов, благодаря чему движение быстро приобретает установившийся характер и уровень в скважинах стабилизируется при большом дебите водозабора.

Водопроводимость водоносного пласта, выражающаяся произведением его мощности на коэффициент фильтрации горных пород, является важным критерием при выборе участка расположения водозабора. Поскольку водопроводимость пород зависит от гранулометрического состава пород или степени их трещиноватости, то характеристике этих свойств должно быть уделено особое внимание. Об относительной водопроводимости пластов можно также судить по удельным дебитам эксплуатационных скважин, имеющихся в районе, а также по данным пробных откачек из скважин.

Минерализация грунтовых вод обычно незначительна, но иногда качество их ухудшается вследствие большого содержания железа.

При съемке должны быть получены данные о химическом составе воды в пределах распространения водоносного горизонта. Кроме того, учитывая незащищенность грунтовых вод от проникновения тех или иных загрязнений с поверхности земли, должна быть получена характеристика воды в бактериологическом отношении.

Большое значение для оценки питания грунтовых вод имеют наблюдения за их режимом, которые должны начинаться уже на этапе гидрогеологической съемки и продолжаться в процессе выполнения разведочных работ; продолжительность наблюдений должна быть не менее одного года. Как отмечалось по данным этих наблюдений, можно оценить величину питания грунтовых вод атмосферными осадками и выбрать достаточно обоснованно отметки статических уровней грунтовых вод, от которых производятся отсчеты понижений их уровней при оценке эксплуатационных запасов.

После проведения съемки выбираются участки (или участок) возможного расположения водозабора, на которых производится предварительная разведка. На каждом участке закладывается несколько скважин, из которых производятся пробные и опытные откачки для установления кривых дебита и определения коэффициентов фильтрации.

После выполнения этих работ приступают к детальной разведке на наиболее благоприятных участках. Учитывая, что при эксплуатации грунтовых вод происходит уменьшение мощности водоносного пласта вследствие его осушения, взаимодействие скважин желательно свести до минимума. Это достигается либо размещением скважин по линии (при тех же расстояниях между скважинами взаимодействие их в этом случае наименьшее), либо устройством нескольких относительно небольших групповых водозаборов, находящихся на значительных расстояниях, а потому мало влияющих друг на друга. Вопрос о целесообразном типе водозабора обычно решается на основе технико-экономических расчетов (протяженность водоводов, число и мощность насосных станций и т. п.). Скважины водозабора закладывают обычно на расстояниях 200—400 *м* друг от друга. При разведке большинство скважин бурится такого диаметра, который обеспечивает их использование в дальнейшем как эксплуатационных.

Для построения кривых дебита из каждой скважины производятся две-три кратковременные откачки, при этом одна с максимально возможным дебитом, составляющим не менее 50%, а в трещиноватых породах — не менее 65—75% предполагаемого эксплуатационного дебита.

По данным опытных откачек рассчитываются коэффициенты фильтрации водоносного пласта. Определение этих коэффициен-

тов по откачкам из одиночных скважин всегда связано с влиянием призабойной зоны и сопротивления фильтра, поэтому рекомендуется также производить кустовые откачки и рассчитывать коэффициент фильтрации по парам наблюдательных скважин. Эти откачки производятся из двух-трех скважин, разрезы которых являются типичными для района водозабора и характеризуют некоторые «средние» условия. При этих откачках определяется также коэффициент уровнепроводности по наблюдениям за изменением уровней воды в скважинах во времени.

Следует заметить при этом, что специальное определение коэффициента уровнепроводности целесообразно производить в тех случаях, когда грунтовые воды приурочены к трещиноватым породам, где величина водоотдачи (μ) варьирует в широких пределах. В рыхлых породах (песок, галечник), пределы изменения водоотдачи у которых весьма незначительные (от 0,15 до 0,25), водоотдача может приниматься равной 0,2 без существенной для практики погрешности.

Понижение уровня воды в скважине, из которой ведется откачка с постоянным дебитом, пропорционально величине $\ln \frac{R_п}{r_0}$, где $R_п$ — приведенный радиус влияния.

По формулам (IV, 7) и (IV, 2):

$$R_п = 1{,}5\sqrt{a_y t} = 1{,}5\sqrt{\frac{kh_{ср}t}{\mu}}. \qquad \text{(XIV, 1)}$$

Примем как достаточно характерные для грунтовых вод, используемых для централизованного водоснабжения, значения $k=10$ *м/сутки*, $h_{ср}=30$ *м*. Срок эксплуатации водозабора $t=10\,000$ суток, радиус скважины $r_0=0{,}10$ *м*.

В этом случае значения величины $\ln \frac{R_п}{r_0}$ при различных значениях водоотдачи μ для рыхлых водоносных пород показаны в табл. 25.

Таблица 25

μ	$\ln \frac{R_п}{r_0}$
0,10	11,30
0,20	10,96
0,30	10,75

Если принять в расчет среднее значение $\mu=0{,}20$, то возможная наибольшая погрешность при определении понижения уровня воды в скважине не превышает 3%. При расчетах взаимодействующих скважин относительная погрешность определения срезок уровней больше (может достигать 10—15%), но абсолютная

ошибка меньше, так как срезка составляет лишь небольшую долю от величины понижения в скважине, из которой ведется откачка.

Учитывая приведенные соображения, для водоносных пластов, сложенных рыхлыми проницаемыми по порам отложениями, μ можно принимать равным 0,20. В этом случае

$$R_{\text{п}} = 3{,}5\sqrt{k h_{\text{ср}} t}. \qquad \text{(XIV, 2)}$$

Для расчета понижения в скважине, работающей без взаимодействия, следует пользоваться формулой (IV, 20):

$$S_0 = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi k} \cdot \ln \frac{R_{\text{п}}}{r_0}}.$$

Расчет понижений взаимодействия скважин производится по формуле (IV, 21).

Если скважины расположены группами на нескольких участках, то расчет взаимодействия между участками производится также по формуле (IV, 20). При этом водозабор на каждом участке рассматривается как «большой колодец» и в расчет вводится суммарный дебит водозабора, причем величина r является расстоянием между центрами «больших колодцев». Срезка уровней от работы других водозаборов, влияющих на данный водозабор, суммируется с понижениями, рассчитанными для него без учета этого влияния.

Понижение уровня воды в скважинах водозабора и в окружающем районе продолжается до тех пор, пока депрессия не распространится до рек, являющихся естественными границами водоносного горизонта. Эта закономерность соблюдается и в тех случаях, когда водоносный горизонт в области развития депрессионной воронки получает питание инфильтрацией атмосферных осадков больше, чем из него отбирается воды при эксплуатации.

Принципиально иное положение создается в тех случаях, когда под влиянием эксплуатации водозабора питание грунтовых вод усиливается. Это возможно при малой глубине залегания грунтовых вод в естественных условиях, когда испарение с поверхности капиллярной каймы существенно уменьшает инфильтрационное питание грунтовых вод или даже становится ему равным. Такие условия свойственны, например, обширным плоским равнинам, сложенным флювиогляциальными песками и слабодренированными реками.

В центральных зонах широких междуречий глубина залегания грунтовых вод обычно составляет 2—3 *м*, уклоны потока ничтожны, движение в горизонтальном направлении практически отсутствует, и накапливаемые весной после снеготаяния запасы грунтовых вод летом в значительной мере или полностью расходуются на испарение. В таких условиях кривая депрессии не занимает своего «нормального» положения, соответствующего величине инфильтрации и коэффициенту фильтрации пласта, а как бы «срезана» поверхностью земли (Биндеман, 1960).

Если при эксплуатации грунтовых вод их свободная поверхность опускается до границы, ниже которой испарение практически отсутствует (в зоне избыточного увлажнения эта граница находится примерно на глубине 3—4 *м* от поверхности земли), то на этом участке усиливается питание грунтовых вод инфильтрацией атмосферных осадков. Это дополнительное питание ограничивает развитие депрессии как в плане, так и в глубину, благодаря чему через некоторое время наступает стабилизация уровней в скважинах водозабора, причем понижения уровней окажутся меньше, чем рассчитанные по приведенным выше формулам.

Если воды напорные, то независимо от состава водоносного пласта по данным опытных откачек должен определяться коэффициент пьезопроводности и расчет эксплуатационных запасов производится по формулам, применяемым для артезианских вод (при условии, что в процессе эксплуатации уровень воды в скважинах не опустится ниже водоупорной кровли пласта).

Если участок водозабора располагается на относительно небольшом расстоянии от реки (меньшем, чем половина приведенного радиуса), причем грунтовые воды находятся в непосредственной гидравлической связи с рекой, то расчет эксплуатационных запасов производится по формулам установившегося движения.

Глава XV

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕЧНЫХ ДОЛИН

Подземные воды аллювиальных отложений современных и древних речных долин, выполненных обычно рыхлообломочными водопроницаемыми породами, играют большую роль в водоснабжении населенных пунктов и промышленных предприятий. Речные долины можно подразделить на две большие группы: долины рек горных областей и долины рек равнинных областей.

Для речных долин горных областей характерны сравнительно большие продольные уклоны, достигающие несколько сотых, и относительно малая ширина. Подземные воды в горных долинах образуют обычно подрусловые потоки, направленные вдоль долины параллельно руслу реки, при этом на некоторых участках долины (обычно в расширениях) происходит поглощение речных вод, на других участках (перед сужениями) отмечается выход родников. Уклоны подземного потока значительны.

В долинах равнинных рек вследствие малого продольного уклона поток грунтовых вод направлен поперек долины.

Водоносные горизонты, приуроченные к аллювиальным отложениям речных долин, обладают рядом характерных черт.

1. Водовмещающими породами этих горизонтов являются рыхлообломочные отложения, проницаемые по порам. В долинах равнинных рек наиболее распространены песчаные и песчано-гравелистые, реже галечниковые отложения, причем крупность материала увеличивается с глубиной. Водоносные отложения нередко прикрыты суглинками и глинами. Во многих случаях переход от более крупного к менее крупному материалу резко выражен и внутри водоносной толщи выделяются два слоя — верхний, представленный супесями и мелкозернистыми песками, и нижний (так называемый базальный горизонт), сложенный крупнозернистыми песками и гравийно-галечниковыми отложениями. Аллювий горных рек, как правило, сложен крупнообломочным материалом, в котором преобладают валуны, галька, гравий, часто с чистым песком; распределение материала по вертикали крайне незакономерно.

2. Области распространения водоносных горизонтов в аллювиальных отложениях имеют большую протяженность, несоизмеримую с их шириной.

3. Мощность аллювиальных отложений долин равнинных рек обычно не превышает 20—25 *м* и лишь в зонах переуглубления долин достигает нескольких десятков, а иногда и сотен метров. В горных долинах мощность аллювия варьирует в очень широких пределах.

4. Глубина залегания грунтовых вод от поверхности земли небольшая (на пойменных террасах до 5 *м*, на древних — от 10 до 20 *м*).

5. Водоносные горизонты в аллювиальных отложениях речных долин обычно имеют свободную поверхность и только в местах, где водоносные породы прикрыты относительно водоупорными суглинками и глинистыми отложениями, наблюдается напор в несколько метров, и лишь в исключительных случаях (древние долины) достигающий десятков метров.

6. Режим грунтовых вод аллювиальных отложений тесно связан с режимом рек. Динамику грунтовых вод аллювиальных отложений речных долин определяют в основном условия их взаимосвязи с поверхностными водами и подземными водами коренных пород.

По условиям взаимосвязи подземных и поверхностных вод долины можно подразделить на два типа:

1) река обладает постоянным водотоком, заиление отсутствует, при эксплуатации подземных вод непосредственная гидравлическая связь поверхностных и подземных вод не нарушается (грунтовый поток не «отрывается» от реки);

2) река либо лишена постоянного водотока, либо обладает постоянным водотоком, но русло ее заилено; при эксплуатации подземных вод заиление может усилиться, поэтому подпитывания водозабора водами реки происходить не будет (кривая депрессии «отрывается» от реки).

Возможен и промежуточный тип, когда русло реки заилено только на отдельных участках, а на других участках связь подземных и поверхностных вод сохраняется.

Гидрогеологические исследования для оценки эксплуатационных запасов подземных вод аллювиальных отложений начинаются с поисков, при которых проводится гидрогеологическая съемка масштаба 1 : 25 000—1 : 50 000. Съемкой должна быть покрыта не только площадь, занятая аллювиальными отложениями, но и примыкающие к ним области развития коренных пород. Съемка должна дать представление о строении и геологической истории долины, составе и условиях залегания аллювиальных отложений, характере распространения подземных вод. Очень важно выявить древние долины, переуглубления, а в горных долинах — сужения и расширения. Следует установить, происходит ли питание грунтовых вод аллювия из коренных пород или последние могут рассматриваться как непроницаемые. Особое внимание должно быть уделено исследованию естественных выходов подземных вод, которые в горных долинах являются поисковым критерием при вы-

боре участка водозабора. В засушливых районах, где по мере удаления от реки пресные воды сменяются минерализованными, необходимо установить границу между различными типами подземных вод.

Одним из важнейших вопросов является установление наличия или отсутствия гидравлической связи между поверхностными и подземными водами. Во всех случаях должны быть собраны данные по режиму реки. В районах, где реки не имеют постоянного водотока, должна быть выявлена продолжительность маловодного периода, во время которого происходит сработка запасов подземных вод, и многоводного, когда происходит их восполнение.

В долинах горных рек с небольшими естественными запасами для оценки их восполнения важно установить расход подруслового потока, выделив участки, где происходит поглощение речных вод. Определение расхода естественного потока по величине поглощения, т. е. гидрометрическими методами, более точно, чем расчет по формуле Дарси, в связи со значительными вариациями коэффициента фильтрации аллювия.

Перечисленные задачи требуют обязательного применения при съемке буровых работ для уточнения геологического строения долины. После проведения гидрогеологической съемки организуется предварительная разведка, целью которой является уточнение геологического строения и выбор участка для детальной разведки.

При предварительной разведке проводится бурение скважин по поперечникам, секущим долину, включая зону причленения аллювия к коренным породам. В долинах равнинных рек рекомендуется закладывать несколько поперечников скважин с примерными расстояниями между ними 1—3 *км*. В долинах горных рек буровые створы задаются перед участками сужений и ниже впадения притоков, а также в зоне предполагаемого поглощения речного стока. Для увязки полученных данных между поперечниками бурятся одиночные скважины. Из характерных для геологического разреза скважин (на поперечниках и одиночных) должны быть произведены пробные и опытные откачки для определения удельных дебитов и коэффициентов фильтрации. В горных долинах для характеристики изменения водопроницаемости по вертикали целесообразно применение метода резистивиметрии.

Для уменьшения объема буровых работ и уточнения мест заложения скважин перед выполнением буровых работ рекомендуется провести электропрофилирование или электрозондирование. Эти геофизические исследования особенно эффективны при поисках древних погребенных долин, к которым нередко приурочены значительные запасы подземных вод.

Для решения вопроса о связи грунтовых вод с поверхностными необходимо провести несколько откачек из скважин, расположенных на расстоянии 10—15 *м* от реки. Наблюдательные скважины при этих откачках должны быть пробурены непосредственно

у русла реки на обоих берегах. Кроме того, необходимо поставить годичные наблюдения за режимом подземных вод, заложив несколько створов наблюдательных скважин поперек долины. На горных реках в местах возможного поглощения должны быть оборудованы временные гидрометрические посты выше и ниже предполагаемого участка поглощения для годичных наблюдений за уровнем, расходом и химическим составом речных вод.

Детальная разведка должна проводиться применительно к предполагаемой схеме размещения водозабора. Целесообразно производить бурение разведочно-эксплуатационных скважин, расположенных приблизительно в тех же точках, что и эксплуатационные скважины. Из всех скважин необходимо провести опытные откачки для определения кривой дебита и коэффициента фильтрации при максимально возможном дебите. На некоторых участках, характеризующихся высокой водопроницаемостью, следует провести кустовые откачки. Если коренные породы, подстилающие аллювий, являются водоносными, то из них следует также провести откачки и отобрать пробы воды на химический анализ.

Откачки из разведочно-эксплуатационных скважин рекомендуется проводить при меженном горизонте реки, когда уровень ее в процессе опробования мало изменяется. На участке должны быть также оборудованы скважины для наблюдения за режимом подземных вод.

Методика оценки эксплуатационных запасов подземных вод в долинах первого и второго типов различны.

Долины первого типа (с постоянной гидравлической связью речных и подземных вод). В этих долинах река является естественной границей потока, причем уровень воды на этой границе испытывает сезонные колебания. При оценке эксплуатационных запасов, рассчитываемых на длительный срок эксплуатации, расчеты следует производить применительно к меженному уровню.

Поскольку при эксплуатации водозабора река является источником питания, наиболее целесообразно скважины закладывать по линии, параллельной реке.

При расположении водозаборов в долинах первого типа дебиты скважин возрастают при приближении водозаборных скважин к реке. Однако закладывать скважины очень близко от русла не рекомендуется, так как приближение водозабора к реке приводит к увеличению напорных градиентов, что может вызвать засасывание илистых частиц в поры водопроводящих пород, заиление русла и уменьшение фильтрации речных вод к водозабору.

Методика определения степени заиления русла в настоящее время еще слабо разработана. По-видимому, минимальным допустимым расстоянием водозабора от реки следует считать расстояние порядка 100—150 *м*. Водозаборные скважины целесообразнее располагать на подмываемых берегах, так как здесь во время паводка может произойти смыв заиленного слоя грунта.

Второй естественной границей, относительно параллельной реке, является зона причленения аллювия к коренным породам. Контактирующие с аллювием коренные породы по степени водопроводимости могут существенно различаться.

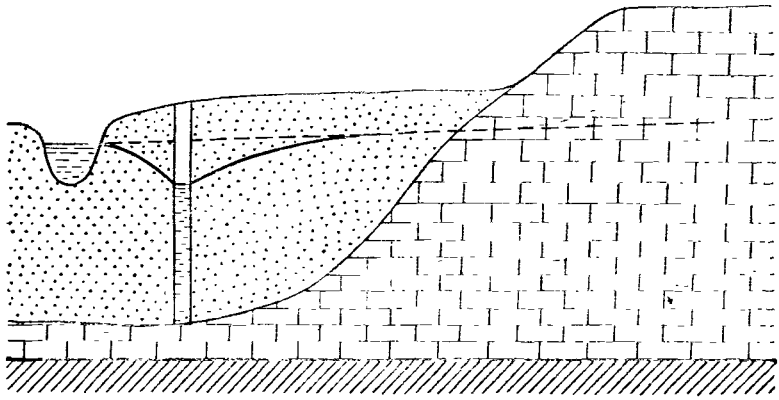


Рис. 56.

1. Водопроводимость коренных отложений может быть близкой к водопроводимости аллювия (рис. 56). При оценке эксплуатационных запасов в этих условиях водоносный пласт следует

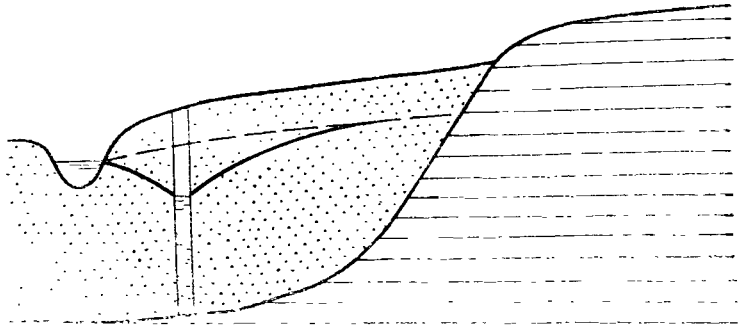


Рис. 57.

рассматривать как ограниченный только со стороны реки (полуограниченный пласт).

2. Коренные породы могут обладать настолько слабой водопроводимостью, что практически водоприток с их стороны отсутствует (рис. 57). Если расстояние от водозабора до реки меньше по крайней мере в два раза, чем расстояние от водозабора до контакта аллювия с коренными породами, то при оценке запасов влиянием второй водоупорной границы можно пренебречь и рассматривать пласт так же, как полуограниченный (приближение линии водозабора к контакту аллювия с водоупорными корен-

ными породами не рационально). В горных долинах наиболее целесообразно эксплуатационные скважины закладывать перед суженными участками, где обычно отмечаются выходы родников и аллювиальные отложения более промыты.

3. Водопроводимость коренных отложений может значительно превосходить водопроводимость аллювия. В этих условиях на контакте коренных и аллювиальных отложений обычно выходят родники, и водозаборы целесообразно располагать либо в приконтактовой зоне, либо непосредственно в коренных породах. Для всех водозаборов, расположенных у реки, характерна быстрая стабилизация уровней и дебитов, что позволяет вести расчеты эксплуатационных запасов по формулам установившегося движения. При этом можно пользоваться либо только гидродинамическими методами, либо одновременно гидравлическими и гидродинамическими методами.

Гидродинамические методы применяются для ориентировочных расчетов в сравнительно простых гидрогеологических условиях. Приближенно, если скважины расположены в виде прямолинейного ряда параллельно берегу реки, понижение уровня в скважинах может быть подсчитано по формуле Маскета—Лейбензона для «бесконечного» ряда (IV, 30):

$$S = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K}\left[\ln\frac{\lambda}{2\pi r_0} + \frac{2\pi l}{\lambda}\right]},$$

где S — понижение уровня в скважине;
λ — расстояние между скважинами;
l — расстояние от линии расположения скважин до реки.

Формула (IV, 30) выражает равные, несколько завышенные величины понижений во всех скважинах водозабора линейного ряда, так как не учитывает увеличения притока к концевым участкам ряда. Следовательно, если понижение, рассчитанное по этой формуле, не превышает допустимого, то запасы можно считать обеспеченными. Однако следует помнить, что при небольшом количестве скважин формула (IV, 30) может дать сильно преувеличенные значения понижений и привести к необоснованным выводам о необходимости увеличения числа скважин или длины ряда.

Более точно величины понижений могут быть найдены по формуле взаимодействующих скважин, расположенных у контура питания. Как было показано, расчеты производятся методом зеркального отображения и наложения течений по формуле (IV, 28):

$$S = H - \sqrt{H^2 - \frac{1}{\pi K}\left(Q\ln\frac{2l}{r_0} + Q_1\ln\frac{\rho_1}{r_1} + \ldots + Q_n\ln\frac{\rho_n}{r_n}\right)},$$

где Q — дебит скважины, в которой определяется понижение уровня;

l — расстояние этой скважины до реки;

$r_1, \ldots r_n$ — расстояние этой скважины до других скважин водозабора, дебиты которых равны $Q_1, \ldots Q_n$;

$\rho_1, \ldots \rho_n$ — расстояние этой скважины до зеркальных отображений других скважин водозабора.

Во многих случаях при двухслойном строении аллювия река не прорезает слабопроницаемые слои, слагающие верхнюю зону аллювия. Тогда при расчете следует учитывать дополнительное сопротивление, возникающее при фильтрации из реки через слабопроницаемый слой. Величина дополнительного сопротивления определяется по формуле В. М. Шестакова (1960):

$$\Delta l = \sqrt{\frac{Kmm_0}{K_0}} \operatorname{cth} b \sqrt{\frac{K_0}{Kmm_0}}, \qquad \text{(XV, 1)}$$

где K и m — коэффициенты фильтрации и мощность нижнего, хорошо водопроводящего слоя;

K_0 и m_0 — то же, верхнего слабо водопроводящего или закальматированного слоя;

b — ширина реки.

Для широких рек величина $\operatorname{cth} b \sqrt{\frac{K_0}{Kmm_0}} = 1$. Величина Δl может быть определена расчетом по данным наблюдений за режимом грунтовых вод (Биндеман, 1957). Учет дополнительного сопротивления заключается в замене величины расстояния до реки (l) расчетной величиной (l_0), определяемой по формуле:

$$l_p = l + \Delta l. \qquad \text{(XV, 2)}$$

В этом случае при построении схем зеркальных отображений расстояния от реальных скважин до реки должны быть увеличены на величину Δl.

В долинах второго типа (т. е. в долинах, характеризующихся постоянным или временным отсутствием взаимосвязи поверхностных и подземных вод и, следовательно, неустановившимся режимом движения подземных вод при эксплуатации) наибольший практический интерес может представлять следующий случай. Ширина долины невелика и коренные породы обладают водопроводимостью значительно меньше водопроводимости аллювиальных отложений. Поэтому коренные породы могут рассматриваться как практически непроницаемые. Постоянный водоток в реке отсутствует. В этих условиях (рис. 58) нужно учитывать влияние обеих водоупорных границ, принимая расход на них равным нулю, и рассматривать пласт как ограниченный с двух сторон непроницаемыми породами (пласт-полоса). Подобные условия характерны для засушливых областей (Центральный Казахстан), а также для

горных рек, если вода из них полностью разбирается на ирригацию или русло реки заилено.

Восполнение запасов в таких условиях происходит только в отдельные многоводные годы, поэтому длительное время дебиты водозаборов обеспечиваются только за счет сработки естественных запасов. Расположение водозаборных скважин зависит от мощности водоносного горизонта и условий восполнения запасов при эксплуатации. Наиболее рациональным по технико-экономическим соображениям является заложение скважин в виде одного или нескольких поперечных рядов, так как при таком рас-

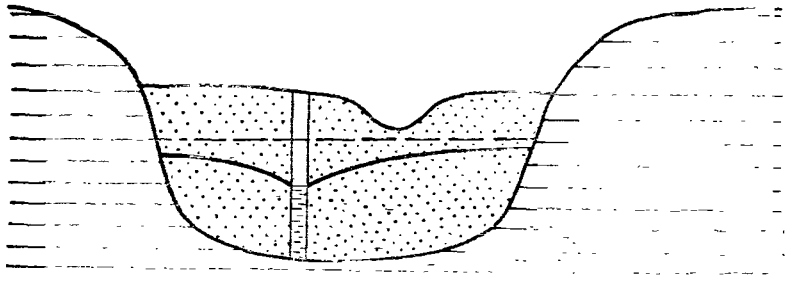


Рис. 58.

положении скважин длина водоводов получается наименьшей по сравнению с расположением скважин вдоль долины.

Как отмечалось, в горных долинах водозаборы следует закладывать перед суженными участками или ниже впадения боковых притоков. В долинах, где мощность водоносного аллювия незначительна и восполнение запасов происходит в кратковременные периоды, целесообразнее закладывать скважины в виде продольных рядов для увеличения фронта, на котором будет происходить фильтрация воды к скважинам в период восполнения. В узких долинах с шириной примерно до 2 *км* следует закладывать один продольный ряд скважин, при большей ширине — два ряда.

При оценке эксплуатационных запасов в рассматриваемых условиях применяется гидродинамический метод. При этом для долин, где поверхностные водотоки действуют периодически, производится два расчета: расчет сработки запасов (в период отсутствия стока) и расчет восполнения запасов (при наличии водотока).

Методика расчетов водозаборов в аллювиальных отложениях речных долин при сработке естественных запасов разработана Ф. М. Бочевером (1959, 1960). Понижение уровня в водозаборных скважинах рассчитывается в зависимости от системы расположения скважин.

При расположении скважин в виде поперечного ряда понижение уровня в каждой водозаборной скважине определяется

только по формуле (XV, 3) для безнапорных вод и аналогичной формуле (IV, 47) для напорных вод.

$$S = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K}\left(\ln\frac{\lambda}{2\pi r_0} + \frac{3{,}55\sqrt{a_y t}}{\lambda}\right)} \qquad \text{(XV, 3)}$$

Эта формула имеет такой же вид, что и формула (IV, 30) для продольного ряда, расположенного у реки, только вместо l (расстояние до реки) в нее входит величина $L_n = 1{,}12\sqrt{a_y t}$ — дальность действия ряда скважин в условиях плоского потока. Кроме того, по сравнению с формулой (IV, 30) в ней второй член в скобках уменьшается в два раза, так как в этом случае рассматривается двусторонний приток.

Если в пласте работают два поперечных ряда скважин, то к понижению уровня, рассчитанному по формуле (XV, 3), необходимо прибавить срезку уровня, образующуюся в скважинах рассматриваемого ряда при работе скважин соседнего ряда.

Эта срезка уровня определяется по формуле:

$$\Delta S = \frac{Q_{\text{сум}}\sqrt{a_y t}}{BKH} R\left(\frac{x}{2\sqrt{a_y t}}\right), \qquad \text{(XV, 4)}$$

где ΔS — срезка уровня в скважинах ряда, в котором определяются понижения при работе соседнего ряда;

$Q_{\text{сум}}$ — суммарный дебит скважин ряда, вызывающего срезку уровня в скважинах рассматриваемого ряда;

x — расстояние от ряда, в скважине которого определяется срезка, до ряда, вызывающего срезку;

B — длина ряда, вызывающего срезку;

$R\left(\frac{x}{2\sqrt{a_y t}}\right)$ — функция, значение которой приводится в табл. 26.

Таблица 26

$\frac{x}{2\sqrt{a_y t}}$	R	$\frac{x}{2\sqrt{a_y t}}$	R
0	0,564	0,7	0,12
0,05	0,52	0,8	0,09
0,1	0,46	0,9	0,07
0,2	0,38	1,0	0,05
0,3	0,31	1,3	0,02
0,4	0,25	1,5	0,01
0,5	0,20	2	0,00
0,6	0,15		

При наличии нескольких рядов расчет срезки уровня от каждого ряда производится по формуле (XV, 4), после чего срезки суммируются.

Пример расчета. В водоносном горизонте, приуроченном к аллювиальным галечникам в долине одной из рек Центрального Казахстана, требуется заложить водозабор с дебитом $Q_{сум}$ — $=160$ *л/сек*. Ширина долины $L=2400$ *м*, поверхностный сток в долине отсутствует в течение 5 лет, т. е. продолжительность расчетного периода 1825 суток. Средняя мощность аллювиальных галечников 16 *м*, средний коэффициент фильтрации, определенный по данным опытных откачек, 95 *м/сутки*. Коэффициент водоотдачи 0,2. Водозаборные скважины предполагается расположить в виде двух поперечных рядов. Расстояние между рядами 4000 *м*, между скважинами в ряду 600 *м*, длина ряда 1800 *м*. Количество скважин в каждом ряду 4, дебит каждой скважины $Q=20$ *л/сек*, радиус водоприемной части $r_0=0{,}2$ *м*. Суммарный дебит каждого ряда $Q_{сум}=80$ *л/сек*.

Определяем коэффициент уровнепроводности по формуле (IV, 2)

$$a_y=\frac{Kh_{ср}}{\mu}=\frac{95\cdot 16}{0{,}2}=7{,}6\cdot 10^3\ м^2/сутки.$$

По формуле (XV, 3) рассчитываем понижение в скважинах ряда, вызванное непосредственно работой этого ряда,

$$S=16-\sqrt{256-\frac{20\cdot 86{,}4}{3{,}14\cdot 95}\left(\ln\frac{600}{6{,}28\cdot 0{,}2}+\frac{3{,}55\sqrt{7{,}6\cdot 10^3\cdot 1825}}{600}\right)}=6{,}4\ м.$$

По формуле (XV, 4) находим срезку уровня от работы соседнего ряда

$$\Delta S=\frac{80\cdot 86{,}4\sqrt{7{,}6\cdot 10^3\cdot 1825}}{1800\cdot 95\cdot 16}R\left(\frac{4000}{2\sqrt{7{,}6\cdot 10^3\cdot 1825}}\right)=1{,}8\ м.$$

Величину R находим по табл. 27:

$$R\left(\frac{4000}{2\sqrt{7{,}6\cdot 10^3\cdot 1{,}825\cdot 10^3}}\right)=R(0{,}52)=0{,}19$$

Полное понижение складывается из понижения, рассчитанного по формуле (XV, 3) и срезки уровня, определенной по формуле (XV, 4).

$$S_{общ}=S+\Delta S=8{,}2.$$

В том случае, если скважины располагаются в виде продольного ряда, понижение уровня определяется по формуле (IV, 55)

$$S=H-\sqrt{H^2-\frac{Q}{\pi K}\left(\ln\frac{R_к}{r_0}+\frac{2at}{R_k^2}-\frac{3}{4}\right)}.$$

Эта формула выведена при допущении, что каждая скважина будет работать в закрытом блоке. Другими словами, принято, что каждая скважина срабатывает естественные запасы на участке, ограниченном линиями, проходящими через середины расстояний между скважинами и непроницаемыми бортами долины. При этом расчете величины понижений, определенные для всех блоков, кроме центрального, получаются несколько преувеличенными.

Площадь блока приводится к равновеликому кругу, радиус которого R, как показано в работе Ф. М. Бочевера (1957), определяется по формуле:

$$R_к=\sqrt{\frac{BL}{\pi}}, \qquad \text{(XV, 5)}$$

где $R_к$ — радиус блока;
B — расстояние между скважинами;
L — ширина долины.

Если работает два продольных ряда скважин, то в формулу (XV, 5) вместо L подставляется L_1 — половина ширины долины.

Пример расчета. В тех же условиях, что и в предыдущем примере, проектируется заложение продольного ряда из восьми скважин с расстоянием между скважинами 1000 *м*. Дебиты и радиусы скважин те же, что и в предыдущем примере.

По формуле (XV, 5) определяем радиус блока

$$R_к=\sqrt{\frac{BL}{\pi}}=\sqrt{\frac{1000\cdot 2400}{3{,}14}}=880\ м.$$

По формуле (IV, 55) рассчитываем понижение уровня в скважинах продольного ряда:

$$S=16-\sqrt{256-\frac{20\cdot 86{,}4}{3{,}14\cdot 95}\left(\ln\frac{880}{0{,}2}+\frac{2\cdot 7{,}6\cdot 10^3\cdot 1825}{880^2}-0{,}75\right)}=14{,}2\ м.$$

Из сравнения полученных результатов видно, что в данных условиях при тех же дебитах и том же количестве скважин понижение в скважинах продольного ряда больше, чем при размещении скважин в двух поперечных рядах. В том и другом случае эксплуатационные запасы обеспечиваются. Однако при устройстве продольного ряда остаточная высота столба воды в скважине всего 16,0—14,2=1,8 *м*, что может затруднить работу насосов, тогда как при расположении скважин по поперечникам этот напор составляет 16,0—8,2=7,8 *м*.

Вопросы восполнения естественных запасов в условиях речных долин с периодически действующим водотоком в условиях экс-

плуатации детально разработаны Ф. М. Бочевером (1960). Если долина широкая и водозабор расположен в центральной его части на расстоянии нескольких километров от границ пласта, то влиянием последних можно пренебречь и рассматривать пласт как неограниченный. Такие условия характерны для некоторых участков крупных речных долин равнинных рек, на которых русло реки заилено, вследствие чего при эксплуатации подземный поток «открывается» от горизонта реки. В этом случае оценка эксплуатационных запасов проводится по формулам, изложенным в гл. XIV.

Глава XVI

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ЛИНЗ ПРЕСНЫХ ВОД

В природе линзы пресных вод имеют широкое распространение. Происхождение их в разных условиях различно.

В районах морских побережий, характеризующихся обильными атмосферными осадками, при наличии мощных толщ песков или других проницаемых пород формируются линзы пресных вод, а также потоки пресных вод, контактирующие с солеными водами только со стороны моря.

Питание такого рода потоков пресных вод, связанное с инфильтрацией атмосферных осадков, в настоящее время достаточно хорошо изучено. Пресные воды в этих условиях издавна эксплуатируются в Голландии и других странах.

На основании исследований, выполненных в районах Средней Азии, В. Н. Кунин (1959) выделяет следующие типы линз пресных вод:

1) подтакырные линзы внутренних районов пустыни;

2) линзы низкогорных и предгорных равнин;

3) подпесчаные линзы пресных вод в районах песчаной пустыни.

Кроме того, следует отметить линзы пресных вод, формирующиеся под руслами, вблизи рек, каналов и на орошаемых территориях.

Подтакырные линзы пресных вод образуются за счет такырного стока. Они имеют обычно небольшие размеры — от долей до нескольких квадратных километров. Объем содержащихся в них пресных вод изменяется от нескольких тысяч до сотен тысяч кубических метров. Очевидно, что такого рода линзы пресных вод имеют местное значение и не могут представлять интереса для централизованного водоснабжения.

Линзы низкогорных и предгорных равнин располагаются в условиях, где поверхностный сток значительно больше, чем на такырах. Лишь небольшая часть этого стока идет на формирование пресных линз, образуемых на стыке песков пустыни с предгорной такырной равниной. Размеры этих линз значительно больше, чем подтакырных. Как указывает В. Н. Кунин (1959), величина питания подгорных линз пресных вод может быть существенно увеличена путем устройства специальных гидро-

технических сооружений, тогда отдельные достаточно крупные линзы пресных вод могут представить интерес и для централизованного водоснабжения.

В естественных условиях площадь отдельных линз данного типа, т. е. развитых на окраине пустыни, достигает 15—30 *км*^{2}, а мощность слоя пресных и солоноватых вод колеблется в пределах 5—25 *м*.

Подпесчаные линзы пустыни характеризуются размерами, изменяющимися от нескольких десятков квадратных метров до многих сотен квадратных километров. В большинстве случаев линзы пресных вод подстилаются солеными водами, но местами они располагаются непосредственно на глинах.

В пустынях Средней Азии гидрогеологическими изысканиями выявлено несколько достаточно крупных подпесчаных линз пресных вод. Наименьшие из них содержат сотни миллионов кубических метров пресной воды, а наиболее крупные — миллиарды кубических метров.

По данным Н. Г. Шевченко (1959), одна из таких линз характеризуется весьма большими размерами в плане, а мощность слоя пресных вод исчисляется десятками метров. Условия образования питания подобного рода крупных линз пресных вод пока еще недостаточно выявлены; в настоящее время нет единого взгляда на их происхождение, но наличие питания крупных линз пресных вод является несомненным, так как иначе существование этих линз оказалось бы невозможным.

Имеющиеся данные о линзах пресных вод пустынных и полупустынных областей позволяют считать, что эти линзы обычно развиты на фоне крупных потоков минерализованных вод (Кунин, 1959). В большинстве случаев общая минерализация соленых вод не превышает 40—50 *г/л*, так что различия в удельных весах и вязкостях пресных и соленых вод невелики. Удельный вес вод изменяется в пределах 1,0—1,03, а вязкость 1,0—1,3 *спз*. Порядок изменения удельного веса весьма мал, а вязкости невелики и колебания их не выходят за пределы изменения коэффициентов фильтрации водоносных пород и точности их определения. На этом основании при рассмотрении фильтрации пресных и соленых вод различием их по вязкости и плотности пренебрегают.

В процессе работы скважины, эксплуатирующей пресные воды, подстилаемые солеными водами, под фильтром образуется «язык» соленых вод, постепенно продвигающийся к фильтру скважины. При более или менее значительном дебите скважины соленые воды достигают фильтра, после чего минерализация откачиваемой воды постепенно возрастает и с течением времени вода может стать непригодной к употреблению.

При некоторой величине дебита скважины, определяемой разницей в удельных весах пресных и соленых вод и положением фильтра в водоносном пласте, можно избежать подсасывания соленых вод. Но в связи с незначительной разницей в удельных ве-

сах пресных и соленых вод, исключить подсасывание последних можно лишь при весьма малых дебитах скважин, не имеющих сколько-нибудь существенного практического значения.

Время (T), через которое начинается подсасывание соленых вод, определяется по приближенной формуле (XVI, 1), вывод которой дается в работе В. Д. Бабушкина (1960).

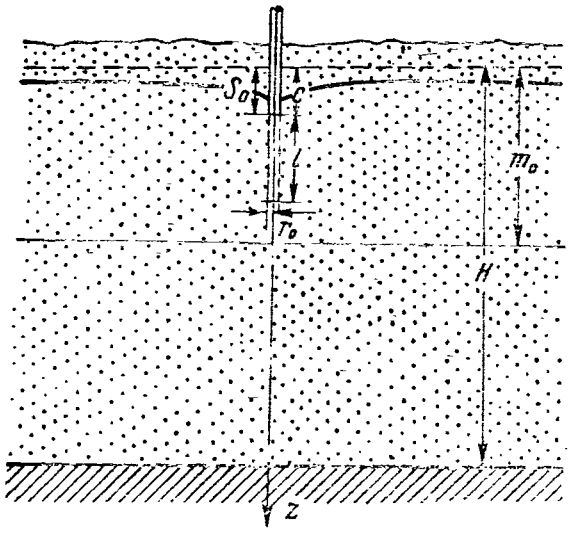


Рис. 59.

$$T=\frac{2\pi p_0}{Q}\left[\frac{m_0^3-b^3}{3}-(m_0-b)(c^2+b^2+cb)+\right.$$

$$\left.+(c+b)^2\sqrt{cb}\cdot\left(\operatorname{arc\,tg}\frac{m_0}{\sqrt{cb}}-\operatorname{arc\,tg}\frac{b}{\sqrt{cb}}\right)\right], \qquad \text{(XVI, 1)}$$

где T — время от начала откачки;

Q — дебит скважины;

p_0 — активная пористость водоносных пород;

m_0 — мощность слоя пресных вод (рис. 59);

$b=c+l$ — расстояние низа фильтра от статического уровня, при этом l — длина фильтра скважины, c — расстояние верха фильтра от статического уровня.

Время T определяется продолжительностью перемещения вершины «языка» соленых вод от границы пресных и соленых вод до фильтра скважины. Формула (XVI, 1) применима, если фильтр скважины располагается в верхней половине водоносного пласта.

В однородном по фильтрационным свойствам водоносном пласте наибольшая минерализация воды, забираемой скважиной, определяется по формуле

$$C=C_1-(C_1-C_0)\frac{m_0}{H}, \qquad \text{(XVI, 2)}$$

где C — наибольшая минерализация воды, получаемой скважиной;

C_1 и C_0 — минерализация соленых и пресных вод;

m_0 и H — мощность слоя пресных вод и общая мощность водоносного пласта в естественных условиях.

Если $C \leqslant C_к$, где $C_к$ — допустимая кондиционная минерализация откачиваемых вод, то эксплуатация пресных вод возможна

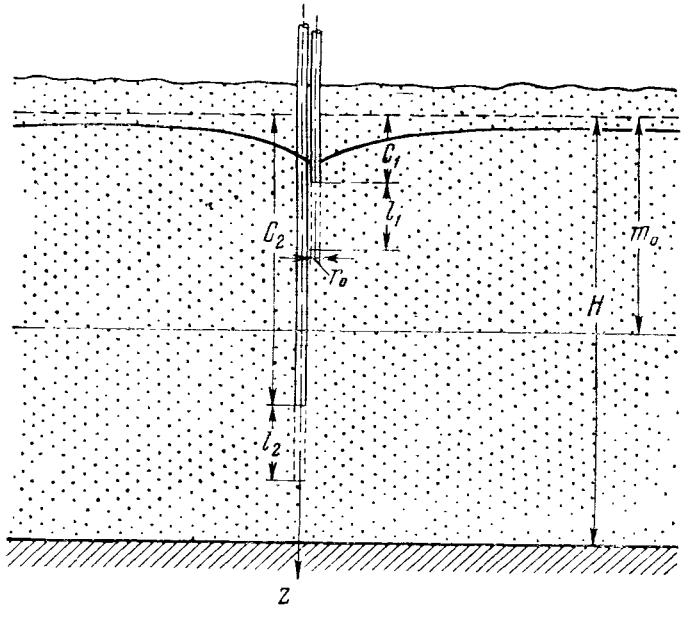


Рис. 60.

без всяких мероприятий по защите водозабора от подсасывания соленых вод снизу.

В случае, когда минерализация откачиваемой воды по расчету превышает кондиционную ($C \geqslant C_к$), эксплуатация пресных вод возможна лишь с защитой от подсасывания соленых вод снизу. Борьба с подсасыванием соленых вод снизу возможна при эксплуатации пресных вод спаренными скважинами (Бабушкин, 1958, 1960). Под спаренными скважинами понимаются две рядом расположенные скважины, из которых одна оборудована фильтром в пресных, а другая в минерализованных водах (рис. 60). В дальнейшем мы будем называть их соответственно верхней и нижней скважиной.

При одновременной откачке из спаренных скважин пресных и соленых вод между фильтрами скважин образуется поверхность раздела потоков, питающих скважины. К верхней скважине поступает вода из части водоносного слоя, расположенной над границей раздела потоков, а нижняя скважина питается потоком, лежащим под границей раздела. Для исключения подсасывания соленых вод верхней скважиной необходимо, чтобы граница раз-

дела потоков располагалась выше границы пресных и соленых вод или, в предельном случае, эта граница, деформированная в процессе откачки, должна совпадать с границей раздела потоков к скважинам.

На основании теоретических соображений и опытов в щелевом лотке, произведенных во ВСЕГИНГЕО, было установлено, что в однородном водоносном пласте для исключения подсасывания соленых вод верхней скважиной отношение дебитов λ скважин, забирающих пресные и соленые воды, не должно быть больше отношения средних мощностей пресных и соленых вод, т. е.

$$\lambda = \frac{Q_п}{Q_с} \leqslant \frac{m_0}{m_1}, \qquad \text{(XVI, 3)}$$

где $Q_п$ и $Q_с$ — дебиты скважин, забирающих пресные и соленые воды;

m_0 и m_1 — мощности слоев пресных и соленых вод.

При расчете работы спаренных скважин определяют:

а) величины λ с помощью зависимости (XVI, 3);

б) положение границы раздела потоков по отношению к спаренным скважинам по вертикальной оси z по формуле:

$$\lambda\left(\frac{1}{b_1+z}-\frac{1}{c_1+z}-\frac{1}{z-b_1}+\frac{1}{z-c_1}\right)+$$

$$+\frac{l_1}{l_2}\left(\frac{1}{H+c'-z}+\frac{1}{H+b_2'-z}+\frac{1}{H-b_2'-z}-\frac{1}{H-c'-z}\right)=0, \qquad \text{(XVI, 4)}$$

где l_1 — длина фильтра верхней скважины, забирающей пресные воды;

l_2 — то же для нижней скважины, забирающей соленые воды;

c_1 — расстояние от статического уровня до верхнего конца фильтра скважины, забирающей пресные воды;

c' — расстояние от нижнего конца фильтра скважины, забирающей соленые воды, до подошвы водоносного пласта;

$b_1 = c_1 + l_1$ — расстояние от нижнего конца верхнего фильтра до статического уровня;

$b_2' = c' + l_2$ — расстояние от верхнего конца нижнего фильтра до подошвы водоносного пласта;

H — мощность водоносного пласта;

z — расстояние от границы раздела потоков к скважинам до статического уровня по оси фильтров (ось z); определяется путем подбора.

Дебит верхней скважины определяется в спаренной системе по формуле:

$$Q_n = \frac{2\pi k H S_1}{\ln \frac{R_n}{r_0} + \varphi_2}, \qquad \text{(XVI, 5)}$$

где S_1 — понижение уровня воды в верхней скважине;

r_0 — расчетный радиус фильтра скважины с учетом ее несовершенства (см. гл. IV);

φ_2 — коэффициент, связанный с влиянием откачки из нижней скважины на понижение уровня воды в верхней скважине:

$$\varphi_2 = \frac{1{,}15}{\lambda}\left(\frac{H}{l_2}\xi_2 + \lg\frac{R^2}{\beta_2}\right), \qquad \text{(XVI, 6)}$$

$$\beta = (2H - b_1)(H + b_1),$$

$$\xi = \lg\frac{b_2^2 - b_1^2}{c_2^2 - b_1^2} + \lg\frac{2H - c_2 - b_1}{2H - b_2 - b_1},$$

где c_1 и c_2 — расстояния от статического уровня до верхних концов фильтров скважин, забирающих пресные и соленые воды;

$b_1 = c_1 + l_1$ и $b_2 = c_2 + l_2$ — расстояния от статического уровня до нижних концов фильтров скважин, откачивающих пресные и соленые воды.

Если длина фильтра нижней скважины невелика по сравнению с мощностью водоносного пласта ($l_2 \leqslant {}^1/_5 H$), то вторым слагаемым в выражении для ξ_2 можно пренебречь.

Дебит нижней скважины спаренной системы может быть вычислен по формуле:

$$Q_c = \frac{Q_1}{\lambda}. \qquad \text{(XVI, 7)}$$

Приведенные выше формулы, относящиеся к одной системе спаренных скважин, действительны и в условиях взаимодействующих скважин для случаев, когда расстояние между скважинами превышает мощность водоносного пласта.

Если граница пресных и соленых вод в плане удалена от водозабора на расстояние, превышающее в 1,5—2 раза поперечные размеры участка водозабора, то последний можно рассматривать как большой колодец с дебитом, равным суммарному дебиту всех скважин водозабора.

В таком случае время перемещения границы пресных и соленых вод может быть определено, как это следует из ряда работ (Чарный, 1956; Шестаков, 1950), по формуле:

$$t = \frac{r_2^2 - r^2}{4\pi a_y}, \qquad \text{(XVI, 8)}$$

где t — время, необходимое на перемещение языка соленых вод в плане от границы линзы до заданной точки;

r_2 — расстояние от скважины, заменяющей водозабор, до границы линзы в начальный момент времени;

r — расстояние от скважины до вершины языка соленых вод на момент времени t;

α — параметр, определяемый из соотношения:

$$\alpha l^2 = A;$$

$$A = \frac{Q}{4\pi a_y p_0 h_{ср}}; \qquad \text{(XVI, 9)}$$

$h_{ср}$ — средняя мощность водоносного пласта в процессе работы водозабора.

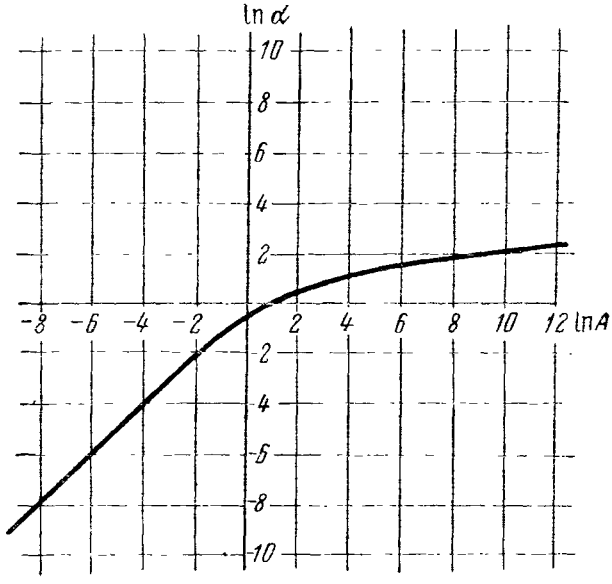


Рис. 61.

Значения $\ln\alpha$ в зависимости от lnA приведены на рис. 61 (по Ф. М. Бочеверу). При $\frac{r^2}{4a_y t} \leqslant 0{,}1$ формула (XVI, 8) приводится к виду, отвечающему условиям установившегося движения:

$$t = \frac{\pi p_0 h_{ср} (r_2^2 - r^2)}{Q}. \qquad \text{(XVI, 10)}$$

Защита водозабора, расположенного вблизи одной из границ линзы, от подсасывания соленых вод осуществляется устройством другого водозабора в зоне распространения соленых вод.

Защитный водозабор должен иметь производительность, равную суммарной производительности эксплуатационного водозабора, и располагаться примерно симметрично эксплуатационному по отношению к первоначальной границе пресных и соленых вод.

При размещении водозаборов наряду с такими факторами, как мощность слоев пресных и соленых вод, проницаемость пород, степень их неоднородности и др., принимается во внимание

и форма линзы в плане. Важным условием является равномерность стягивания контура линзы. Обеспечение этого условия соответствует наиболее рациональному размещению водозаборов на линзе, позволяющему при соблюдении ряда других условий оценить максимальные эксплуатационные запасы пресных вод линзы.

Когда крупная линза имеет форму, приближающуюся к окружности, то один или несколько водозаборов следует разместить ближе к центру линзы. Если линза пресных вод достаточно вытянута, водозаборы целесообразно расположить по длинной оси линзы, если другие показатели этому не препятствуют. Водозабор может представить собой линейный ряд скважин.

Расчет эксплуатационных запасов пресных вод производится с учетом особенностей, связанных с работой спаренных скважин и стягивания контура линзы. Формула для расчета понижения уровня воды в любой скважине с фильтром в пресных водах имеет следующий вид:

$$S_{ni}=\frac{1}{2\pi k h_{ср}}\left[\frac{Q_{ni}}{2}\ln\frac{2{,}25a_y t}{r_0^2}+\Phi_н+\varphi_2-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{i=n-1}Q_i E_i\left(-\frac{r_i^2}{4a_y t}\right)\right], \quad \text{(XVI, 11)}$$

где Q_{ni} — производительность данной скважины, забирающей пресные воды;

Q_i — суммарный дебит верхней и нижней скважин спаренной системы;

S_{ni} — понижение уровня воды в верхней скважине;

r_0 — приведенный радиус фильтра скважины, забирающей пресные воды, с учетом несовершенства скважины;

r_i — расстояние от скважины, в которой определяется понижение уровня воды, до i-той скважины водозабора;

n — число пар скважин водозабора;

φ_2 — коэффициент влияния откачки из нижней скважины на понижение уровня воды в верхней скважине, определяемый по формуле (XVI, 6);

$\Phi_н$ — дополнительное сопротивление на несовершенство верхней скважины.

Ориентировочная оценка эксплуатационных запасов линз пресных вод может быть произведена методом аналогии с помощью следующей зависимости:

$$Q_x=Q_n\frac{V_x}{V_n}, \quad \text{(XVI, 12)}$$

где V_n — естественные запасы пресных вод линзы, эксплуатационные запасы которой известны;

V_x — то же для линзы, эксплуатационные запасы которой определяются;

Q_n — эксплуатационные запасы данной линзы.

Следует учитывать, что установление мощности пресных вод в пределах линзы, положения поверхности ее зеркала и колебания его во времени на различных участках дает лишь косвенные

данные, характеризующие питание линзы. Поэтому, когда расчеты водозаборов подземных вод осуществляются с учетом начальной свободной поверхности линзы и действительных мощностей пресных и соленых вод, эксплуатационные запасы включают в себя как естественные запасы, так и естественные ресурсы, обусловленные питанием (возобновляемые запасы).

В задачи гидрогеологических исследований, производящихся для оценки эксплуатационных запасов линз пресных вод, входит:

1) изучение данных о размерах и конфигурации линзы пресных вод в плане и в разрезе;

2) определение мощности соленых вод и характера изменения ее в пределах линзы;

3) характеристика свободной или пьезометрической поверхности в пределах линзы пресных вод, а также поверхности раздела пресных и соленых вод;

4) характеристика химического состава пресных и соленых вод, причем соленые воды должны быть охарактеризованы и в некотором удалении (до 1—2 *км*) от границы линзы;

5) характеристика фильтрационных свойств пород в зоне пресных и соленых вод с выделением линз и прослоев глинистых пород в водоносной толще;

6) изучение степени неоднородности пород в плане и в разрезе с постановкой опытов по определению активной пористости пород.

Поисковые работы заключаются в проведении гидрогеологической съемки масштаба 1 : 50 000—1 : 25 000 с широким применением геофизических и геоботанических методов. Из геофизических методов на стадии поисков могут быть применены разработанные и усовершенствованные во ВСЕГИНГЕО (Н. А. Огильви, О. М. Мясковский и В. А. Шемшурин): 1) радиокип (для получения данных о развитии линз в плане); 2) электроразведочные (для определения мощности линз пресных вод и развития их в плане).

Бурение поисковых скважин с отбором проб воды и пробными откачками производится лишь в отдельных точках.

Предварительная разведка линз пресных вод осуществляется в основном путем бурения скважин, которые располагаются по двум взаимно-перпендикулярным поперечникам. Из скважин производятся опытные откачки для определения гидрогеологических параметров водоносного пласта.

На стадии детальной разведки бурение производится на участке размещения водозабора. Скважины опробуются опытными откачками из спаренных скважин.

Изучение режима подземных вод организуется уже на стадии поисковых работ. Помимо наблюдений за колебанием уровня грунтовых вод, очень важно проследить изменение границы пресных и соленых вод (методом резистивиметрии) во времени, а также изменения химического состава и температур пресных и соленых вод.

В первый период эксплуатации изучение режима грунтовых вод должно продолжаться как в районе водозабора, так и на ближайшем к ним участке контура линзы. Наблюдения производятся:

1) за производительностью водозаборов пресных и соленых вод и изменением минерализации их в процессе эксплуатации;

2) за положением уровней воды в скважинах, положением границы пресных и соленых вод и минерализацией подземных вод в районе водозаборов;

3) за положением уровней и поверхности раздела пресных и соленых вод на контуре линзы.

Наблюдения за режимом подземных вод позволят уточнить прогноз изменения уровней воды в районе водозаборов и на линзе и тем самым внести необходимые коррективы в режим эксплуатации водозабора.

В процессе эксплуатации, после того как будет установлено перемещение границ пресных и соленых вод у контура линзы, может потребоваться заложение дополнительных створов наблюдательных скважин, предназначенных для уточнения характера и интенсивности перемещения границы пресных и соленых вод в плане и разрезе.

В целях распространения данных наблюдений за режимом вод на площади следует не реже одного раза в два года геофизическими методами проводить наблюдения за перемещением контура линзы в плане.

Глава XVII

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНАХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВОДОЗАБОРОВ

Очень часто гидрогеологическим организациям приходится решать задачу водоснабжения городов, населенных пунктов, промышленных объектов в районах, где уже имеются действующие водозаборы. Как показывает практика рассмотрения отчетов в ГКЗ, нередки случаи, когда гидрогеологи, проводящие изыскания в таких районах, совершенно недостаточно изучают опыт эксплуатации и начинают разведку новых участков без учета работы действующих водозаборов. В одних случаях проводится дорогостоящая разведка новых участков при возможности удовлетворения потребности путем расширения действующего водозабора, в других — новый водозабор проектируется на таких расстояниях от действующего, что эксплуатация его при взаимодействии с существующим может ухудшить работу или совсем вывести из строя действующие скважины в связи с «перепонижением» уровня подземных вод.

Анализ режима работы действующих водозаборов позволяет решать следующие задачи:

1) оценивать эксплуатационные запасы подземных вод на участке водозабора и тем самым дать прогноз о возможности увеличения его дебита или необходимости сокращения водоотбора;

2) правильно выбирать новые участки для разведки подземных вод в том случае, если гидрогеологические условия действующего водозабора не позволяют увеличить его дебит;

3) получать наиболее достоверные данные (гидрогеологические параметры и характеристику граничных условий) для оценки эксплуатационных запасов подземных вод в районах, находящихся в аналогичных гидрогеологических условиях.

При анализе работы действующего водозабора мы имеем дело не с относительно непродолжительными опытами, относящимися к отдельным «точкам» водоносного пласта, как в случае опытных откачек из отдельных скважин, а с мощной откачкой из системы взаимодействующих скважин, продолжающейся годами. При этом влияние отдельных факторов, формирующих эксплуатационные запасы и трудно определяемых раздельно (питание водоносного горизонта, водопроводимость и другие свойства пласта, пере-

текание из смежных водоносных горизонтов и пр.), учитывается по их совокупности.

Изучение опыта работы действующего водозабора должно начинаться с его рекогносцировочного обследования. Во время обследования гидрогеолог должен собрать сведения о количестве водозаборных скважин, их расположении, наличии наблюдательных скважин, и неработающих водозаборных резервных скважин, которые могут быть использованы в качестве наблюдательных. В эксплуатирующей организации необходимо получить данные о суммарном дебите и его изменении с начала эксплуатации водозабора, режиме его работы (суточные и сезонные изменения дебита). На месте нужно ознакомиться с оборудованием скважин, установить возможность замера в них динамических уровней, и там, где это возможно, эти уровни замерить.

По архивным и опросным данным необходимо установить положение динамического уровня на несколько моментов времени предшествующей эксплуатации для определения характера режима (установившийся или неустановившийся) подземных вод в районе водозабора.

Следует иметь в виду, что на многих крупных водозаборах в настоящее время проводятся наблюдения за режимом подземных вод силами гидрогеологических станций. Поэтому гидрогеологам, проводящим изыскания для водоснабжения, необходимо ознакомиться с результатами этих наблюдений и получить данные об изменении уровня и дебита водозабора. Для тех водозаборов, на которых стационарных наблюдений за режимом не проводится, по результатам обследования следует составить программу работ по сбору данных и проведению наблюдений за режимом подземных вод, в необходимых случаях предусмотреть бурение специальных наблюдательных скважин.

В этой программе должно быть предусмотрено выполнение определенного комплекса работ.

1. **Сбор и обобщение данных о геологическом строении, гидрогеологических условиях и истории эксплуатации водозабора.** Вначале эти данные должны быть получены при рекогносцировочном обследовании. В дальнейшем в результате ознакомления с фондовыми и архивными материалами они должны быть уточнены и детализированы.

Для района водозабора необходимо собрать и обобщить все региональные гидрогеологические материалы. Следует составить гидрогеологическую карту района водозабора в масштабе 1 : 25 000 — 1 : 50 000 для артезианских и 1 : 10 000 — 1 : 25 000 для грунтовых вод. Карта сопровождается детальными гидрогеологическими разрезами такого же горизонтального масштаба, на которых показывается литология пород, уровни, напоры и т. д. Соотношение горизонтального и вертикального масштаба должно обеспечивать отчетливый показ уклонов депрессионной поверхности, соотношение напоров в этажнорасположенных горизонтах,

связь с реками и т. д. При наличии связи подземных вод с поверхностными необходимо получить данные о режиме реки (озера) и о количестве осадков за период эксплуатации водозабора. В ирригационных районах следует собрать данные о количестве поливных вод, интенсивности поливов, величине отбора поверхностных вод для орошения.

В связи с тем что по большинству районов крупномасштабных гидрогеологических карт пока нет (имеются лишь карты масштаба 1 : 200 000 и для немногих районов) допускается составление карт-схем на топографической основе. Гидрогеологический материал на такие карты можно схематично переносить с карт более мелких масштабов. На карту-схему должны быть нанесены все эксплуатационные и наблюдательные скважины района. Эта же карта служит основой для построения гидроизогипс или гидроизопьез. Для участка расположения обследуемого водозабора составляется крупномасштабный план 1 : 10 000 — 1 : 5 000, на котором также показываются водозаборные и наблюдательные скважины.

При изучении истории работы водозабора необходимо по возможности установить отметку статического уровня подземных вод до начала эксплуатации водозабора, используя в этих целях отчеты по изысканиям, проводившимся для строительства водозабора. При отсутствии таких данных ориентировочное представление о статическом уровне подземных вод можно составить по скважинам, находящимся заведомо вне зоны влияния водозабора и расположенным по линии, проходящей через водозабор, в направлении, перпендикулярном направлению естественного потока подземных вод. Однако в тех случаях, когда водоносный горизонт используется многими водозаборами в течение длительного времени, в результате чего происходит общее региональное снижение уровней подземных вод (например, в районе Москвы и ее окрестностей), этот прием оказывается невозможным.

Во всех случаях необходимо собрать данные об изменениях дебитов водозаборных скважин и понижении уровней во времени. Если нет данных о дебитах отдельных скважин (в случае, когда вода из скважин поступает в общий водовод), нужно получить данные об изменении суммарного дебита. В некоторых случаях о дебитах отдельных скважин за прошедшие годы можно судить по их производительности в настоящее время, если оборудование скважины (тип насоса, глубина погружения приемного клапана) за время эксплуатации не изменилось.

Для сбора данных по динамике уровней необходимо использовать все имеющиеся замеры уровней в период ремонта и во время других остановок скважин.

Данные о работе водозабора за прошедшее время следует отобразить на графике, по оси абсцисс которого откладывается время, а по оси ординат — дебиты и понижения уровня. На графике должен быть показан суммарный дебит, а в случае, если

водозабор состоит из небольшого количества скважин, рассредоточенных по площади, то и дебит каждой скважины. Вертикальный масштаб графика должен показывать изменение дебита и уровней воды в скважинах предельно наглядно. Горизонтальный масштаб (шкалу времени) целесообразно принимать 1 месяц — 1 *см*, при длительной работе водозабора (более 5—10 лет) 1 месяц — 0,5 *см*.

По всем эксплуатационным скважинам должны быть собраны данные о продвижении фронта этих вод в плане, об изменении минерализации воды в эксплуатационных скважинах.

2. **Проведение наблюдений за изменением уровней подземных вод, их химическим составом и дебитом водозаборных скважин.** В тех случаях, когда на рассматриваемом водозаборе такие наблюдения проводятся гидрогеологическими станциями, разведочным организациям достаточно получить данные наблюдений на гидрогеологических станциях. Если же водозабор стационарными систематическими наблюдениями не охвачен, следует организовать цикл таких наблюдений, продолжительность которых должна составлять не менее 1 года. При этом следует иметь в виду, что по уже собранным в начальный период работ данным можно сделать ориентировочный вывод о возможности расширения действующего водозабора. В том случае, если обследуемый водозабор не может удовлетворить заданной потребности, необходимо приступить к поискам новых участков и их предварительной разведке, не дожидаясь окончания годичного цикла наблюдений на действующем водозаборе. Эти работы в таких случаях должны проводиться параллельно. При выборе новых участков необходимо учитывать возможное взаимодействие проектируемых водозаборов с существующими.

При организации наблюдений на крупных действующих водозаборах, на которых отсутствует наблюдательная сеть, можно рекомендовать следующую систему расположения наблюдательных скважин, учитывая, что наблюдения по ним должны продолжаться и после прекращения работ по разведке подземных вод.

При расположении водозаборов в неограниченных пластах места для наблюдательных скважин выбираются в зависимости от схемы водозабора. Если водозабор состоит из большого количества скважин, сосредоточенных по площади, желательно оборудовать два взаимопересекающихся луча скважин, проходящих через центр депрессионной воронки.

На каждом луче следует заложить по 5—7 скважин: одну — в центре воронки, две — внутри большого колодца, на расстоянии 0,25—0,5 его радиуса (в обе стороны от центра), две — на расстоянии 1—1,25 его радиуса и еще две — на расстоянии 1,5—2,0 радиуса (также в обе стороны). Скважины, оборудованные внутри большого колодца желательно располагать на расстоянии 100—200 *м* от наиболее высокодебитных скважин водозабора в напорных горизонтах и 25—50 *м* — в безнапорных.

Если водозабор состоит из ряда сосредоточенных узлов скважин, каждый из которых представляет большой колодец и образует выраженную воронку депрессии, следует оборудовать наблюдательные скважины между такими колодцами.

В том случае, если водозабор состоит из нескольких скважин, рассредоточенных по площади, наблюдательные скважины целесообразно располагать между водозаборными. Кроме того, в непосредственной близости около наиболее высокодебитной скважины желательно иметь наблюдательную (на расстоянии 15—20 *м* в безнапорных горизонтах и 30—50 *м* — в напорных).

Если водозабор располагается на близком расстоянии (до 2—3 *км*) от границ пласта, то поперечники наблюдательных скважин должны достигать границы водоносного горизонта: крайняя наблюдательная скважина должна закладываться в непосредственной (5—10 *м*) близости от границы. В том случае, если границей горизонта является река, целесообразно заложение наблюдательной скважины на противоположном от водозабора берегу реки.

Если водозабор у реки расположен в виде линейного ряда, то крайняя с нагорной стороны наблюдательная скважина на поперечнике, проходящем перпендикулярно линии расположения скважин, должна размещаться на расстоянии, не превышающем удвоенное расстояние водозабора от реки.

На водозаборах, эксплуатирующих подземные воды конусов выноса, наблюдательные скважины следует размещать в зависимости от размеров конусов и размеров депрессионных воронок. Если размеры конуса выноса по сравнению с размерами депрессии очень велики, наблюдательные скважины следует располагать как в неограниченных пластах. При расположении водозаборов недалеко от границы (замещение гравийно-песчаных отложений суглинистыми) наблюдательные скважины должны задаваться так же, как в полуограниченных пластах. При этом следует иметь в виду, что в связи с большой фильтрационной неоднородностью отложений в плане и их слоистостью (чередованием хорошо проницаемых и слабопроницаемых прослоек) в разрезе желательно оборудовать наблюдательные скважины по нескольким лучам в плане и на несколько водоносных прослоев в разрезе.

Приведенные рекомендации о расположении скважин являются сугубо ориентировочными. В каждом конкретном случае количество и расположение наблюдательных скважин должно устанавливаться с учетом перспектив развития водозабора и особенностей геологических условий.

Наблюдения за уровнем подземных вод и замеры дебитов эксплуатационных скважин в течение годичного цикла наблюдений должны выполняться раз в месяц, а также при изменении величины водоотбора (остановках водозабора на воскресные и праздничные дни и т. д.). Поэтому гидрогеологам-разведчикам следует получить в эксплуатирующей организации графики работы водо-

заборных скважин и пуска в эксплуатацию новых скважин. На инфильтрационных водозаборах, тесно связанных с реками, во время паводков такие наблюдения надо проводить ежедневно. Следует отметить одно важное обстоятельство. Очень часто при проведении наблюдений на действующих водозаборах гидрогеологически ограничиваются замерами уровней, а данные по дебитам получают из актов эксплуатирующих организаций. При этом нужно иметь в виду, что нередки случаи, когда эксплуатирующая организация приводит величины дебитов, исходя из паспортной характеристики установленных в скважинах насосов. Поэтому гидрогеологи-разведчики должны обязательно произвести собственные контрольные замеры дебитов скважин, которые и будут рассматриваться как фактический материал, обосновывающий запасы подземных вод на данном водозаборе.

Пробы воды на химический и бактериологический анализы, как правило, должны отбираться раз в квартал, а на водозаборах с возможностью подноса минерализованных вод — раз в месяц.

3. **Проведение наблюдений за восстановлением уровня при прекращении эксплуатации скважин. Эти наблюдения проводятся для уточнения расчетных параметров.** В результате анализа многолетней работы водозабора уточняются режим подземных вод на участке, граничные условия и проводится определение основных гидрогеологических параметров. Параметры определяются также по данным наблюдений за восстановлением уровня при остановке эксплуатационных скважин (см. главу VIII). По данным наблюдений за восстановлением уровня целесообразно определять коэффициенты водопроводимости. Коэффициенты пьезопроводности и уровнепроводности следует определять по данным многолетней эксплуатации водозабора.

При определении параметров по данным многолетней эксплуатации водозабора наиболее часто на практике встречаются следующие два случая:

а) когда водозабор состоит из значительного количества скважин, сосредоточенных в виде площадных, кольцевых или линейных систем, и когда (как правило) известен только суммарный дебит водозабора;

б) когда водозабор состоит из нескольких скважин, разбросанных по площади, причем имеются данные по дебитам отдельных скважин.

В первом случае для определения параметров реальные скважины заменяются одним укрупненным водозабором, так называемым большим колодцем. Радиус этого колодца определяется, как показано в работе Ф. М. Бочевера (1965), в зависимости от системы расположения скважин по формулам:

для площадной системы

$$R_0 \approx 0{,}1P, \qquad \text{(XVII, 1)}$$

для линейной системы

$$R_0 \approx 0{,}2l, \qquad \text{(XVII, 2)}$$

где R_0 — радиус большого колодца;

P — периметр действительной площади расположения скважин при площадной системе;

l — длина ряда скважин при линейной системе.

Для кольцевой системы радиус равен истинному радиусу кольца, по которому расположены скважины.

Далее составляется график изменения суммарного дебита водозабора от времени, причем изменение дебита следует схематично представить в виде ступенчатого графика. На этом же графике показывается ход изменения понижения во времени.

Определение параметров проводится по методике, изложенной в гл. VIII для откачки с изменяющимся дебитом. Коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности определяются по формулам (VIII, 48) и (VIII, 51). В последней за r принимается:

1) если определение проводилось по скважине, расположенной внутри большого колодца, — радиус большого колодца R_0; в этом случае понижение отсчитывается от статического уровня до восстановившегося уровня при остановке данной скважины;

2) если определение проводилось по наблюдательной скважине, расположенной за границами колодца, — расстояние от центра колодца до этой скважины; наиболее точно по этому методу рассчитываются параметры при расположении наблюдательных скважин от центра на расстоянии, превышающем 1,5 R_0.

Во втором случае, когда водозабор состоит из небольшого числа рассредоточенных по площади скважин, определение параметров также проводится графоаналитическим методом путем составления графика $S=f(\lg t_n)$.

Все расчеты выполняются так же, как и при групповой откачке (формулы VIII, 48 и VIII, 49).

Приведенные выше зависимости справедливы для неограниченного пласта. Так как исследуемые водозаборы могут работать продолжительное время, на характер изменения уровня в некоторых случаях может сказываться влияние границ пласта. В этих условиях график $S=f(\lg t_n)$ может отклоняться от прямой линии и для определения параметров должна быть использована часть графика до точки отклонения. Таким образом, значение графика не исчерпывается возможностью определения расчетных параметров. Этот график является также своеобразным индикатором — показателем влияния граничных условий. Выполаживание на графике прямой линии (отклонение ее к оси абсцисс) свидетельствует о влиянии дополнительного питания (поверхностные водотоки, перетекание из ниже- и вышележащих водоносных горизонтов). Наоборот, отклонение прямой к оси ординат показывает на влияние непроницаемых границ.

В некоторых случаях, когда водозаборы работают продолжительное время, а влияние границ пластов довольно быстро сказывается на величинах понижения уровня, на графике $S=f(\lg t_n)$ прямолинейный участок не выделяется. Тогда для определения параметров описанный выше способ анализа многолетней эксплуатации водозабора неприменим. В этих случаях параметры следует определять аналитическим путем, решая соответствующее данным граничным условиям уравнение динамики подземных вод. Таким же путем определяется коэффициент водопроводимости при установившемся режиме подземных вод.

В тех случаях, когда ход изменения понижения уровня во времени неизвестен, но имеются данные о коэффициентах водопроводимости водоносного горизонта и о величине понижения уровня от статического, коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности) может быть также определен аналитическим путем — решением соответствующих данным граничным условиям уравнений движения подземных вод. Если в рассматриваемых условиях происходило изменение дебита, для простоты расчетов целесообразно пользоваться величиной приведенного времени, которое следует определять по формуле (XVII, 3):

$$t_{\text{пр}}=\frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i}{Q_n}, \qquad \text{(XVII, 3)}$$

где Q_i — дебит водозабора на отрезке времени;

Q_n — дебит скважины на последнем этапе эксплуатации.

Численный анализ формулы (XVII, 3) показал, что она дает точность, вполне достаточную для практических расчетов. После этого коэффициент пьезопроводности определяется по формуле, описывающей работу скважины (водозабора) с постоянным дебитом Q_n в течение времени $t_{\text{пр}}$.

Пример расчета. В неограниченном пласте работает водозабор, состоящий из 12 скважин, эксплуатирующих напорные воды. Приведенный радиус водозабора $R_0=470$ *м*. Водозабор работал в течение 12 лет, причем первые 4 года дебит составлял 5000 *м*^{3}/*сутки*, последующие 5 лет — 12 000 *м*^{3}/*сутки*, а дальнейшие 3 года — 18 000 *м*^{3}/*сутки*. Понижение уровня в наблюдательной скважине, расположенной в центре водозабора, к концу 12 года составило 27 *м*. Средний коэффициент водопроводимости, определенный по данным первичных откачек, составил 500 *м*^{2}/*сутки*. Требуется определить коэффициент пьезопроводности.

Таким образом, имеем следующие данные:

$$Q_1=5000\ м^3/сутки;\quad t_1=4\ \text{года};$$
$$Q_2=12\,000\ м^3/сутки;\quad t_2=5\ \text{лет};$$
$$Q_3=18\,000\ м^3/сутки;\quad t_3=3\ \text{года};$$
$$R_0=470\ м;\quad km=500\ м^2/сутки;$$
$$S=27\ м.$$

Для определения коэффициента пьезопроводности предварительно по формуле (XVII, 3) рассчитаем приведенное время:

$$t_{\text{пр}} = \frac{5000 \cdot 4 + 12\,000 \cdot 5 + 18\,000 \cdot 3}{18\,000} = 7{,}45 \text{ лет} = 2620 \text{ сутки}.$$

Коэффициент уровнепроводности определяем по формуле (IV, 6), характеризующей работу скважины в неограниченном пласте с постоянным дебитом, подставляя в эту формулу $t_{\text{пр}} = 2620$ суток, $Q_3 = 18\,000$ *м³/сутки* и $R_0 = 470$ *м*.

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{2{,}25at}{R_0^2}.$$

Из этой формулы

$$\ln a = \frac{4\pi kmS}{Q} + 2\ln R_0 - \ln 2{,}25 - \ln t; \qquad \text{(XVII, 4)}$$

$$\ln a = \frac{12{,}56 \cdot 500 \cdot 27}{18\,000} + 2\ln 470 - \ln 2{,}25 - \ln 2620 = 13{,}15;$$

$$a = 5 \cdot 10^5 \text{ м}^2 \text{ сутки}.$$

После определения параметров нужно сделать прогноз о возможности увеличения дебита действующего водозабора или необходимости сокращения современного дебита.

Решение этих задач необходимо проводить по этапам.

1. Определить, может ли водозабор работать с существующим дебитом в течение всего срока эксплуатации, а если нет, то определить время работы водозабора с этим дебитом до достижения допустимого понижения.

2. В том случае, если в конце расчетного срока эксплуатации понижение уровня будет меньше допустимого, дать прогноз о возможном увеличении дебита водозабора. При этом необходимо привести несколько расчетов, каждый раз задаваясь дебитом водозабора и определяя величину понижения уровня. Максимальным дебитом водозабора следует считать дебит, соответствующий предельно допустимому понижению уровня.

3. Если расчет при условии сохранения существующего дебита показал, что в процессе эксплуатации понижение уровня будет превосходить допустимое, следует определить насколько должен быть уменьшен дебит исследуемого водозабора. Как и в предыдущем случае, необходимо сделать несколько расчетов, задаваясь различными дебитами и определяя величину понижения.

Все указанные выше расчеты производятся по формулам гидродинамики в зависимости от граничных условий, схемы водозабора и гидравлического характера водоносного горизонта. Как и при определении коэффициента пьезопроводности, целесообразно для упрощения расчетов использовать приведенное время.

Подобные расчеты при ориентировочных значениях параметров следует проводить в самом начале изучения работы действующего водозабора. Это нужно делать для того, чтобы иметь пред-

ставление о порядке величины возможного водоотбора на действующем водозаборе и в случае необходимости своевременно организовать поиски новых участков. Как отмечалось, новые участки следует располагать с учетом взаимовлияния проектируемого и действующего водозаборов.

Можно рассмотреть пример прогноза возможности, увеличения дебита водозабора по данным, приведенным в предыдущем примере. Известно, что величина допустимого понижения составляет 45 *м*. Требуется определить, насколько может быть увеличен дебит водозабора при эксплуатации его еще в течение 15 лет (через 15 лет предполагается использовать воды поверхностных источников).

Коэффициент пьезопроводности, определенный по данным эксплуатации, равен $5 \cdot 10^5$ *м²/сутки*.

Прежде всего определяем понижение уровня в центре водозабора при условии, если в течение последующих 15 лет сохранится дебит 18 000 *м³/сутки*. Для этого по формуле (XVII, 3) рассчитаем значение приведенного времени, принимая t_3 равным 18 годам ($t_3 = 3 + 15 = 18$).

$$t_{пр} = \frac{5\,000 \cdot 4 + 12\,000 \cdot 5 + 18\,000 \cdot 18}{18\,000} = 23 \text{ года}.$$

По формуле (IV, 6) определяем понижение:

$$S = \frac{18\,000}{12{,}57 \cdot 500} \ln \frac{2{,}25 \cdot 10^5 \cdot 23 \cdot 365}{470^2} = 29{,}2 \text{ м}.$$

Так как рассчитанное понижение оказалось меньше допустимого (45 *м*), можно поставить вопрос об увеличении дебита водозабора. Принимаем дебит водозабора в течение последующих 15 лет $Q = 27\,000$ *м³/сутки*. Расчет также проводим по приведенному времени:

$$t_{пр} = \frac{5\,000 \cdot 4 + 12\,000 \cdot 5 + 18\,000 \cdot 3 + 27\,000 \cdot 15}{27\,000} = 20 \text{ лет}.$$

Понижение рассчитываем по формуле (IV, 6)

$$\frac{27\,000}{12{,}56 \cdot 500} \ln \frac{2{,}25 \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 365}{470^2} = 44 \text{ м};$$

(при $S_{доп} = 45$ *м*).

Таким образом, по нашему прогнозу, дебит водозабора может быть увеличен с 18 000 до 27 000 *м³/сутки* при дальнейшем сроке эксплуатации 15 лет.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Значение функции $E_i(-x)$ при $x = \frac{r^2}{4at}$

x	$E_i(-x)$	x	$E_i(-x)$	x	$E_i(-x)$	x	$E_i(-x)$
0,00	$-\infty$	—0,34	—0,815	—0,68	—0,388	—1,2	—0,158
—0,01	—4,01	—0,35	—0,794	—0,69	—0,381	—1,3	—0,136
—0,02	—3,35	—0,36	—0,775	—0,70	—0,374	—1,4	—0,116
—0,03	—2,96	—0,37	—0,755	—0,71	—0,367	—1,5	—0,100
—0,04	—2,68	—0,38	—0,737	—0,72	—0,360	—1,6	—0,0863
—0,05	—2,47	—0,39	—0,719	—0,73	—0,353	—1,7	—0,0747
—0,06	—2,30	—0,40	—0,702	—0,74	—0,347	—1,8	—0,0647
—0,07	—2,15	—0,41	—0,686	—0,75	—0,340	—1,9	—0,0562
—0,08	—2,03	—0,42	—0,670	—0,76	—0,334	—2,0	—0,0489
—0,09	—1,92	—0,43	—0,655	—0,77	—0,328	—2,1	—0,0426
—0,10	—1,82	—0,44	—0,640	—0,78	—0,322	—2,2	—0,0372
—0,11	—1,74	—0,45	—0,625	—0,79	—0,316	—2,3	—0,0325
—0,12	—1,66	—0,46	—0,611	—0,80	—0,311	—2,4	—0,0284
—0,13	—1,59	—0,47	—0,598	—0,81	—0,305	—2,5	—0,0249
—0,14	—1,52	—0,48	—0,585	—0,82	—0,300	—2,6	—0,0219
—0,15	—1,46	—0,49	—0,572	—0,83	—0,294	—2,7	—0,0192
—0,16	—1,41	—0,50	—0,560	—0,84	—0,289	—2,8	—0,0169
—0,17	—1,36	—0,51	—0,548	—0,85	—0,284	—2,9	—0,0148
—0,18	—1,31	—0,52	—0,536	—0,86	—0,279	—3,0	—0,0130
—0,19	—1,26	—0,53	—0,525	—0,87	—0,274	—3,1	—0,0115
—0,20	—1,22	—0,54	—0,514	—0,88	—0,269	—3,2	—0,0101
—0,21	—1,18	—0,55	—0,503	—0,89	—0,265	—3,3	—0,00894
—0,22	—1,15	—0,56	—0,493	—0,90	—0,260	—3,4	—0,00789
—0,23	—1,11	—0,57	—0,483	—0,91	—0,256	—3,5	—0,00697
—0,24	—1,08	—0,58	—0,473	—0,92	—0,251	—3,6	—0,00616
—0,25	—1,04	—0,59	—0,464	—0,93	—0,247	—3,7	—0,00545
—0,26	—1,01	—0,60	—0,454	—0,94	—0,243	—3,8	—0,00482
—0,27	—0,985	—0,61	—0,445	—0,95	—0,239	—3,9	—0,00427
—0,28	—0,957	—0,62	—0,437	—0,96	—0,235	—4,0	—0,00378
—0,29	—0,931	—0,63	—0,428	—0,97	—0,231	—4,1	—0,00335
—0,30	—0,906	—0,64	—0,420	—0,98	—0,227	—4,2	—0,00297
—0,31	—0,882	—0,65	—0,412	—0,99	—0,223	—4,3	—0,00263
—0,32	—0,858	—0,66	—0,404	—1,00	—0,219	—4,4	—0,00234
—0,33	—0,836	—0,67	—0,396	—1,1	—0,186	—4,5	—0,00207

Абрамов С. К., Бабушкин В. Д. Методы расчета притока воды к буровым скважинам. Госстройиздат, 1955.

Абрамов С. К., Биндеман Н. Н., Бочевер Ф. М., Веригин Н. Н. Влияние водохранилищ на гидрогеологические условия прилегающих территорий. Госстройиздат, 1960.

Абрамов С. К., Семенов М. П., Чалищев А. М. Водозаборы подземных вод. Госстройиздат, 1956.

Альтовский М. Е. Методика гидрогеологических изысканий в целях водоснабжения. ОНТИ, 1936.

Альтовский М. Е. Расчет дебита по откачкам из одиночных скважин. Госгеолиздат, 1940.

Альтовский М. Е. Методическое руководство по расчету взаимодействующих артезианских и грунтовых водозаборов. Госгеолиздат, 1947.

Бабушкин В. Д., Глазунов И. С., Шевченко Н. Г. Методы подсчета эксплуатационных запасов для водозаборов, расположенных в районах крупных линз пресных вод. «Разведка и охрана недр», 1958, № 8.

Бабушкин В. Д., Глазунов И. С., Шевченко Н. Г. Метод эксплуатации крупных линз пресных вод спаренными скважинами и оценка эксплуатационных запасов водозаборов. Докл. к собранию Междунар. ассоциации гидрогеологии. Госгеолтехиздат, 1960.

Биндеман Н. Н. Определение динамических запасов грунтовых вод по водоотдаче песков. Изд. ВНИИ ВОДГЕО, 1952.

Биндеман Н. Н. (при участии К. Т. Анохиной). Определение гидрогеологических параметров по данным наблюдений за режимом грунтовых вод при паводках. Изд. ВНИИ ВОДГЕО. 1957.

Биндеман Н. Н. К вопросу об использовании запасов подземных вод. «Разведка и охрана недр», 1960, № 4.

Биндеман Н. Н. К определению запасов грунтовых вод зандровых и аллювиальных равнин. «Разведка и охрана недр», 1960, № 10.

Биндеман Н. Н. Об искусственных запасах подземных вод. «Бюлл. ОНТИ», № 1 (29). Госгеолтехиздат, 1961.

Биндеман Н. Н. К определению естественных запасов подземных вод. «Разведка и охрана недр», 1962, № 1.

Бородин Р. В. Определение запасов подземных вод на опыте гидрогеологических исследований в районах рудных месторождений Средней Азии. Тр. Ин-та геол. АН Уз. ССР, вып. 3, 1949.

Бочевер Ф. М. О постановке опытных откачек в условиях неустановившегося движения для определения гидрогеологических параметров. «Разведка и охрана недр», 1956, № 12.

Бочевер Ф. М. Типизация гидрогеологических условий для целей расчета эксплуатационных запасов подземных вод. «Советская геология», 1958, № 9.

Бочевер Ф. М. Неустановившийся приток грунтовых вод к скважине в долинах рек. Изд. АН СССР, 1959.

Бочевер Ф. М. Неустановившийся приток грунтовых вод к линейному ряду скважин в артезианских бассейнах. «Изв. АН СССР», 1960.

Бочевер Ф. М. Расчет сработки запасов грунтовых вод в долинах рек засушливых областей. Тр. ВНИИ ВОДГЕО, № 3, 1960.

Бочевер Ф. М. Гидрогеологические расчеты крупных водозаборов и водопонизительных установок. Госстройиздат, 1965.

Бочевер Ф. М., Веригин Н. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. Госстройиздат, 1961.

Бочевер Ф. М., Кожевникова Е. А. О методике оценки запасов подземных вод для водоснабжения в долинах рек Центрального Казахстана. «Разведка и охрана недр», 1957, № 9.

Бочевер Ф. М., Алексеев В. С. Оценка сопротивления водозаборных скважин по опытным и эксплуатационным данным. «Разведка и охрана недр», № 3, 1964.

Веригин Н. Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. Госстройиздат, 1962.

Воробков А. Н., Гаврилко В. М., Лобачев П. В., Шестаков В. М. Водопонижение в гидротехническом строительстве. Госстройиздат, 1960.

Гиринский Н. К. Основные теории движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями в неоднородных грунтах. Науч. зап. МГМИ, вып. 5, 1938.

Жуковский Н. Е. Теоретические исследования о движении подпочвенных вод. Изб. соч., т. 1. Гостехиздат, 1948.

Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод. Госгеолтехиздат, 1962.

Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод. Госгеолиздат, 1943.

Каменский Г. Н. Гидрогеологические исследования и разведка источников водоснабжения. Госгеолиздат, 1947.

Киселев П. А. Изучение водоотдачи пород при помощи индикаторов. Изв. АН БССР, № 2, 1951.

Куделин Б. И. Гидрогеологический анализ и методы определения подземного питания рек. Тр. лабор. гидрогеол. проблем АН СССР, 1949, № 5.

Куделин Б. И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. Изд. МГУ, 1960.

Кунин В. Н. Местные воды пустыни и вопросы их использования. Изд. АН СССР, 1959.

Лебедев А. В. Определение коэффициента уровнепроводности по данным стационарных наблюдений за режимом грунтовых вод. «Разведка и охрана недр», № 7, 1961.

Лыков А. В. Теория теплопроводности. Гостехтеориздат, 1952.

Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Гостоптехиздат, 1949.

Методическое руководство по гидрогеологической съемке масштабов 1 : 1000—1 : 500 000 и 1 : 200 000—1 : 100 000. Под ред. Маккавеева А. А. и Рябченкова А. С. Госгеолтехиздат, 1961.

Мятиев А. Н. Напорный комплекс подземных вод и колодцы. «Изв. АН СССР», № 9, 1947.

Огильви Н. А. К вопросу о расчетах капгажных буровых скважин в пластонапорных системах. Тр. лабор. гидрогеол. проблем АН СССР, т. X, 1951.

Плотников Н. А. Новый метод определения коэффициентов водоотдачи водоносных пород способом откачек. «Гидротехника и мелиорация», 1955, № 2.

Плотников Н. А. Оценка запасов подземных вод. Госгеолтехиздат, 1959.

Плотников Н. И. Водоснабжение горнорудных предприятий. Госгортехиздат, 1959.

Саваренский Ф. П. Гидрогеология. Госгеолиздат, 1935.

Скабалланович И. А. Методика опытных откачек. Госгеолтехиздат, 1960.

Теиенбаум Л. Я., Гринбаум И. И. Упрощенный метод расчета водопроводимости и коэффициента фильтрации пород на основе единичного удельного дебита откачек. «Разведка и охрана недр», № 2, 1956.

Ткачук В. Г. Определение приходной части баланса грунтовых вод с сезонными колебаниями их уровня. Тр. лабор. гидрогеол. проблем АН СССР, т. 11, 1949.

Чарный И. А. Основы подземной гидравлики. Гостоптехиздат, 1956.

Шевченко Н. Г. Пресные воды песчаной пустыни на примере Западных Каракумов. Труды ВСЕГИНГЕО. Госгеолтехиздат, 1959.

Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков. Изд. ВНИИ ВОДГЕО, 1961.

Шестаков В. М. Об определении гидрогеологических параметров по данным опытных откачек в условиях неустановившейся фильтрации. «Разведка и охрана недр», № 12, 1962.

Шелкачев В. Н. Упругий режим пластовых водонапорных систем. Гостоптехиздат, 1948.

Шелкачев В. Н. Разработка нефтеносных пластов при упругом режиме. Гостоптехиздат, 1959.

Язвин Л. С. Краткие указания по определению гидрогеологических параметров артезианских водоносных горизонтов для оценки запасов с учетом упругого режима. Труды ВСЕГИНГЕО, 1961.

Язвин Л. С. О количестве понижений при проведении опытных откачек для оценки эксплуатационных запасов подземных вод. «Разведка и охрана недр», № 5, 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3
Глава I. **Классификация запасов и ресурсов подземных вод** 5
Глава II. **Начальные и граничные условия водоносных пластов** . . . 10
Граничные условия в вертикальном разрезе пласта 13
Граничные условия в плане 16
Глава III. **Общая характеристика методов оценки эксплуатационных запасов подземных вод** 23
Глава IV. **Гидродинамические методы** 34
Неограниченный водоносный пласт 35
Полуограниченные водоносные пласты 35
Водоносный пласт-полоса 60
Водоносный пласт, ограниченный круговым контуром 67
Глава V. **Гидравлические методы** 71
Кривые дебита 71
Расчет взаимодействия скважин 76
Глава VI. **Совместное применение гидравлических и гидродинамических методов** 78
Расчет понижения в скважине, работающей без взаимодействия . 79
Расчет срезок уровней 80
Оценка эксплуатационных запасов по аналогии 82
Глава VII. **Балансовые методы** 85
Оценка естественных запасов подземных вод 86
Оценка естественных ресурсов подземных вод 92
Глава VIII. **Определение основных расчетных гидрогеологических параметров** 105
Режим движения подземных вод при опытных откачках . . . 107
Методика откачек 108
Расчет коэффициентов фильтрации, водопроводимости, уровнепроводности и пьезопроводности 113
Определение приведенного радиуса влияния 130
Определение внутреннего фильтрационного сопротивления . . . 134
Глава IX. **Стадии гидрогеологических исследований и категории эксплуатационных запасов подземных вод** 135
Поисковые работы 135
Предварительная разведка 136
Детальная разведка 137
Категории запасов 138
Глава X. **Оценка эксплуатационных запасов подземных вод в артезианских бассейнах платформенного типа** 140
Глава XI. **Оценка эксплуатационных запасов подземных вод в артезианских бассейнах горноскладчатых областей** 146
Глава XII. **Оценка эксплуатационных запасов подземных вод в карстовых районах** 152

Глава XIII. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод в конусах выноса и пролювиальных шлейфах 157
Глава XIV. Оценка эксплуатационных запасов грунтовых вод в междуречье 172
Глава XV. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод аллювиальных отложений речных долин 178
Глава XVI. Оценка эксплуатационных запасов линз пресных вод . . 190
Глава XVII. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод в районах действующих водозаборов 200
Приложение 210
Литература 211

Биндеман Николай Николаевич
Язвин Леонид Семенович

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Редактор издательства *В. С. Потапов*
Технический редактор *В. В. Соколова*
Корректор *П. А. Денисова*

Сдано в набор 15/IX-1969 г.
Подписано в печать 6/VIII-1970 г.
Т-12755 Формат 60×90¹/₁₆ Печ. л. 13,5
Уч.-изд. л. 13,3 Бумага №2 Индекс 3—4—1
Заказ 914/9689-2. Тираж 3000 экз. Цена 77 коп.

Издательство «Недра». Москва, К-12,
Третьяковский проезд, д. 1/19.
Ленинградская картфабрика ВАГТ.